

Experimentos sobre la Difracción de la Luz: Guía de Enseñanza del Principio de Huygens-Fresnel

German David Medina Leguízamo

Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional

Trabajo de Grado

Mtro. Francis Moreno Otero

29 de Mayo de 2023

Experimentos sobre la Difracción de la Luz: Guía de Enseñanza del Principio de Huygens-Fresnel

German David Medina Leguízamo

Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Física

Director del trabajo:

Mtro. Francis Moreno Otero

Universidad Pedagógica Nacional

Departamento de Física

Línea de Profundización: La Actividad Experimental para la Enseñanza de la Física

Bogotá D.C. 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por acompañarme en todo el proceso seguido en la universidad, por darme la fuerza y la fe que me permite culminar una carrera universitaria, y por permitirme confiar en él y en el plan que tiene destinado para mi vida, gracias a mi madre quien estuvo siempre ahí a mi lado apoyándome y dándome motivación para dar este gran paso, gracias a la educadora de educadores Universidad Pedagógica Nacional por permitirme ser estudiante en sus aulas y por abrir espacios donde se aprende y comparten gratos momentos, sin la menor duda es una grandiosa universidad que marcó mi vida, al Departamento de Física y a todos los maestros que tuve gracias por sus valiosas enseñanzas, no me arrepiento de haber escogido esta gran carrera de Licenciatura en Física, a todos los maestros de otras facultades con los que tuve clase agradezco también sus enseñanzas, al maestro Francis Moreno por su asesoramiento e importantes aportes al trabajo de grado, finalmente agradezco a todas las personas con las que compartí en la universidad y que por algún momento fueron parte de mi historia.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
METODOLOGÍA.....	6
PREGUNTA PROBLEMA.....	11
OBJETIVO GENERAL	11
Objetivos Específicos	11
1. CONTEXTO HISTÓRICO	12
1.1 Breve Historia de la Difracción de la Luz	12
1.2 Teorías de Newton y Huygens	18
2. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
2.1 Diferencia entre Óptica Geométrica y Óptica Física.....	20
2.2 Ondas Sonoras, de Radio y de Luz	22
2.3 Difracción de Fraunhofer por una Rejilla.....	24
2.4 Observaciones Experimentales de Fresnel.....	28
2.5 Principio de Babinet.....	31
2.6 Teoría de las Zonas de Fresnel sobre la Difracción de la Luz	31
3. LA IMPORTANCIA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL Y LA DIFRACCIÓN EN EL ÁMBITO EDUCATIVO	36
3.1 Influencia de las Clases y de los Libros en la Construcción de los Conceptos.....	36
3.2 Papel de la Actividad Experimental en la Educación Científica	40
4. ELABORACIÓN DE LA GUÍA	44
5. REFLEXIONES FINALES	46
Referencias	47
Anexo 1: Guía de actividades experimentales	51
Anexo 2: Factor de oblicuidad	72
Anexo 3: Análisis para un número de zonas par	73

Lista de Figuras

FIGURA 1. DIAGRAMAS DE GRIMALDI -----	13
FIGURA 2. REFRACCIÓN DE LA LUZ SEGÚN HUYGENS-----	19
FIGURA 3. LUZ AL TRANSITAR DE AIRE A AGUA SEGÚN LA TEORÍA DE NEWTON -----	20
FIGURA 4. DISTINCIÓN ENTRE ÓPTICA GEOMÉTRICA Y LA ÓPTICA FÍSICA AL INTENTAR AISLAR UN RAYO LUMINOSO-----	21
FIGURA 5. ENFOQUE DE LA IMAGEN DE UNA CÁMARA OSCURA-----	21
FIGURA 6. ESTENOPOS-----	22
FIGURA 7. DIFRACCIÓN DEL SONIDO-----	23
FIGURA 8. PROPAGACIÓN DE UN FRENTE DE ONDA -----	27
FIGURA 9. EXPERIENCIA REALIZADA POR LORD BROUGHAM -----	30
FIGURA 10. TRES PRIMERAS ZONAS DE FRESNEL -----	32
FIGURA 11. VECTORES DE AMPLITUD DE LAS ZONAS DE FRESNEL -----	35
FIGURA 12. PLACAS ZONALES-----	36
FIGURA 13. ESQUEMA REALIZADO POR HUYGENS-----	38

Lista de Fotografías

Foto 1. Materiales Base para Láser.....	52
Foto 2. Base para Láser.....	52
Foto 3. Soporte para Marco y Bases para Nivelar.....	53
Foto 4. Materiales Marco Diapositiva.....	53
Foto 5. Marco para Diapositiva	53
Foto 6. Materiales Rendija Alargada	53
Foto 7. Rendija Alargada	53
Foto 8. Materiales Rendija Alargada con Cinta	54
Foto 9. Rendija Alargada Formada con Cinta	54
Foto 10. Materiales Abertura Circular	54
Foto 11. Abertura Circular	54
Foto 12. Materiales Doble Rendija	55
Foto 13. Doble Rendija en Papel Aluminio	55
Foto 14. Materiales Aberturas y Obstáculos Poligonales	55
Foto 15. Aberturas y Obstáculos Poligonales	56
Foto 16. Materiales Aberturas Poligonales Formadas con Cinta	56
Foto 17. Aberturas Poligonales	56
Foto 18. Materiales Iris o Abertura Circular Variable	56
Foto 19. Iris o Abertura Circular Variable	57
Foto 20. Materiales Difracción por Abertura Circular	58
Foto 21. Montaje y Patrón Observado Difracción por Abertura Circular	58
Foto 22. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular	59
Foto 23. Montaje Experimental y Observación del Punto de Poisson.....	59
Foto 24. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular	60
Foto 25. Montaje Experimental y Observación del Punto de Poisson	60
Foto 26. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular	60
Foto 27. Observación del Punto de Poisson	60
Foto 28. Materiales Difracción por una Rendija Alargada	61
Foto 29. Montaje Experimental y Observación Difracción por una Rendija	61
Foto 30. Materiales Difracción por el Borde de una Pantalla Opaca	61
Foto 31. Montaje Experimental y Observación Difracción por una Pantalla Opaca	61
Foto 32. Materiales Difracción por un Alambre Fino Alargado	62
Foto 33. Difracción por un alambre fino alargado	62
Foto 34. Materiales Difracción por Dos Rendijas Juntas	63
Foto 35. Montaje y Observación Difracción por dos rendijas juntas	63
Foto 36. Materiales Difracción por una Placa Zonal de Fresnel	63
Foto 37. Montaje Experimental para Medir las Distancias Focales de las placas	64
Foto 38. Plantillas Zonas de Fresnel	71
Foto 39. Toma de Fotografías a la Plantilla	71
Foto 40. Negativos Revelados	71
Foto 41. Placas de Fresnel Ubicadas en el Marco	71

INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo es plantear una propuesta experimental, a modo de guía (**Ver Anexo 1**) que podrá ser usada en el aula. La propuesta se basa en la metodología de aprendizaje activo (*MAA*), y desde un enfoque fenomenológico apoyado por la actividad experimental se busca tener una aproximación al principio de Huygens-Fresnel, para así construir el concepto de difracción de la luz visible. La propuesta se articula con el rol que aquí se le asigna a la actividad experimental, entendiendo que la práctica experimental en la ciencia y en el aula de estudios, se encamina a la construcción y comprensión de fenomenologías.

El enfoque presentado es el fenomenológico donde se involucra tanto la perspectiva cualitativa como la cuantitativa, el mismo fenómeno que se estudia nos enseña a partir de la observación y la experimentación minuciosa. En este caso, se busca aclarar preguntas como: ¿por un haz de luz láser que incide sobre un fino cabello o alambre forma un patrón de puntos luminosos alineados perpendiculares al alambre? o ¿por qué surge un punto luminoso en el centro de la sombra proyectada por un balín iluminado con una fuente puntual de luz láser? para pasar después a cuestiones abstractas relacionadas con la ontología como: ¿qué es la luz? ¿de qué está compuesta la luz? ¿es la luz partícula u onda? ¿Qué hace que la luz tome el camino que le tome el menor tiempo y no otros? Estos misterios sobre la luz impulsan al fenomenólogo a idear estrategias encaminadas a obtener la mayoría de los datos relevantes sobre el fenómeno.

El enfoque fenomenológico y la actividad experimental se relacionan fuertemente con la (*MAA*) que cuenta con algunas definiciones como: el sujeto debe realizar tareas, acciones o actividades y estas son las que posibilitan que el aprendizaje ocurra. En este sentido, la guía experimental propuesta se encamina a que los estudiantes pongan en dinamismo los aprendizajes,

que estos sean utilizados y vinculados significativamente, ya que si esto no se hace el cerebro rápidamente prescinde de ellos; el estudiante no solo oye la clase, sino que realiza alguna actividad que posibilita que el aprendizaje ocurra y el docente se enfoca en desarrollar estas actividades según los aprendizajes que quiere que los estudiantes logren (Jerez, 2015).

Ahora bien, uno de los componentes que se tratan en este trabajo es una aproximación histórica a los distintos puntos de vista sobre la luz, hasta llegar al momento que por primera vez se observa el fenómeno de la difracción, teniendo en cuenta que este acontecimiento fue realmente un punto de quiebre en la historia desde donde se propuso otras teorías sobre la naturaleza de la luz. Naturalmente, como el enfoque propuesto para este trabajo es fenomenológico resulta relevante revisar históricamente las diferentes concepciones sobre la luz y los experimentos propuestos para llegar a esas concepciones.

Al realizar montajes experimentales en el aula y proporcionar la visualización de los patrones de interferencia o difracción de la luz, se tiene en cuenta la dificultad que implica para el estudiante comprender cual es el origen y cuáles son las causas inmersas que conducen a la formación de patrones con alto grado de simetría como es la difracción. Resulta complejo para los estudiantes comprender que, en una región del espacio, como en una ranura muy angosta o en un pequeño agujero, se forman ondas, debido a que no se tiene una experiencia sensible y nuestros sentidos son limitados para visualizar dichos focos de ondas, por lo tanto, en ese momento solo se cuenta con la visualización de los efectos.

Otro problema que se ha evidenciado cuando se presenta el fenómeno, tanto en las clases de óptica de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) como en el Colegio Manuela Beltrán donde se llevó a cabo la práctica pedagógica, es que las clases están enmarcadas en entregar conocimientos dejando aparte la actividad experimental que da las bases para afianzar conceptos.

Además, la escasa actividad experimental se hace más evidente por la falta de recursos de los colegios que dificulta que cuenten con un laboratorio abastecido con los instrumentos necesarios para un aprendizaje adecuado de la física, además, en algunos no se cuenta con laboratorio, haciendo que las practicas experimentales se restrinjan o no se lleven a cabo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea hacer una guía de experimentos básicos sobre difracción de la luz (**Ver Anexo 1**) para el docente de bachillerato que sirva para que con los estudiantes construyan los elementos para llevar a cabo los experimentos con materiales económicos y fáciles de conseguir. Se espera que a partir de estos experimentos se llegue a construir algunos conceptos básicos sobre la difracción, así como conseguir una aproximación al principio de Huygens-Fresnel de una forma sencilla, pues este fenómeno se puede observar en el laboratorio y en varios eventos de la naturaleza. El trabajo que realizan los propios estudiantes lo describe un docente de la siguiente forma *“los estudiantes reaccionan positivamente cuando trabajan con material cotidiano y equipo realizado por ellos mismos ... se evidencian aspectos como la motivación, trabajo colaborativo, argumentación de ideas y observaciones y la construcción del concepto de una manera significativa”* (Torres, 2012, pág. V).

La experimentación es una herramienta de enseñanza que brinda al estudiante la posibilidad de confirmar o refutar teorías y generar nuevos modelos explicativos del mundo que los rodea. El docente de ciencias brinda a los estudiantes actividades concebidas para obtener estudiantes críticos, con ideas nuevas, que comparta sus ideas en grupo para resolver problemas, esto es más importante que memorizar fórmulas y ecuaciones que no entiende y por lo tanto le son intrascendentes. En este sentido es indispensable, desde un enfoque fenomenológico, caracterizar los diferentes aspectos que involucra el fenómeno mediante las propuestas e iniciativas experimentales que posibiliten el establecimiento de conceptos.

Se sugiere empezar a abordar los fenómenos físicos ondulatorios desde los experimentos, pudiéndose referir a las diferentes clases de ondas como las sonoras, ondas en la superficie de un líquido o las ondas sísmicas, las cuales requieren de un medio para propagarse, refiriéndose posteriormente, a las ondas electromagnéticas como la luz, las cuales no necesitan de un medio para propagarse. Todas estas clases de ondas tienen características que son comunes a todas, estas son: la reflexión, la refracción, la difracción y la interferencia.

El presente trabajo surgió a partir de la problemática que vio el autor sobre la forma como se aborda la enseñanza de la difracción de la luz y la escasa importancia que se le asigna a la actividad experimental en los colegios. Estas inquietudes surgieron en la universidad en los cursos de óptica y en las practicas pedagógicas en los colegios, lo que conllevó a la revisión de fuentes documentales de trabajos sobre óptica, difracción, enseñanza de la difracción y actividad experimental, y consulta de textos que citan a personajes reconocidos que trabajaron con la luz como Grimaldi, Huygens, Newton, Young y Fresnel. Incluso el teorema sobre los frentes de onda de Malas y Dupin y la cámara oscura de Alhacén entraron en este análisis. Algunos influyeron de mayor manera en la investigación, por lo tanto, fueron tratados con mayor detalle como es el caso de las observaciones de difracción de luz de franjas coloreadas hechas por Grimaldi, los trabajos de Young de interferencia y los trabajos de Fresnel de difracción de luz por Zonas de Fresnel, siendo éste último el que guía el trabajo experimental, ya que éste se aborda desde el principio de Huygens-Fresnel y da explicación a fenómenos como la propagación rectilínea de la luz, principal problema que tenía que resolver la teoría ondulatoria, y la mancha de Poisson hecho con el cual se intentaba refutar la teoría ondulatoria de Fresnel.

El siguiente paso fue el diseño de las actividades experimentales para aproximar al principio de Huygens-Fresnel de la difracción de la luz, estas se realizaron en un cuarto oscuro. La

construcción de los objetos donde incidió la luz fueron alambres delgados, orificios circulares, aberturas con formas poligonales, discos opacos, placas de Fresnel, pantallas paralelas, etc., y en la parte posterior del cuarto se ubicó la pantalla de observación en donde se proyectaron los patrones de difracción. Un antecedente significativo para esta investigación fue consultado para la obtención de placas de Fresnel titulado: *Un experimento simple utilizado en la producción de placas de zona de Fresnel* de la revista brasileña de enseñanza de física cuya autora es Márcia Muller, donde las placas se obtuvieron con un negativo fotográfico, un patrón de placa y una cámara fotográfica.

Luego se pasó a la observación del fenómeno de la difracción de la luz, en esta parte se hizo un registro fotográfico de los montajes y de las características relevantes del fenómeno como color, intensidad, franjas, forma, distribución, etc. Aquí el control de variables fue importante, ya que permitió la “organización de una serie de experiencias y observaciones” (Malagón, 2012) a partir de las características que se modificaron. “Esto permite la construcción y comprensión de las fenomenologías” (Malagón, 2012), es decir, profundizar en el fenómeno.

Por último, se hizo una reflexión por parte del autor respecto del trabajo experimental realizado, cómo podrá este contribuir a que los estudiantes perciban las prácticas de laboratorio como investigación con la intención de “ampliar la experiencia, construir formas de hablar del fenómeno y concretar supuestos conceptuales” (Malagón, 2012). En específico ampliar los conocimientos acerca de la difracción y comportamiento de la luz al incidir sobre objetos que difractan, así como las dificultades presentadas tanto en la construcción de los montajes como en la práctica y observación del fenómeno, y las recomendaciones finales para la realización de los montajes y la actividad experimental.

Así pues, se debe definir la situación problemática que se va a abordar, el asunto de investigación surge desde nosotros como seres llenos de inquietudes respecto de los fenómenos que se presentan en la naturaleza. En investigación fenomenológica cuantitativa o cualitativa no se tiene prejuicios de la realidad, esta se aborda tal cual como se nos presenta (Guerrero et al., 2016). Un ejemplo de la perspectiva fenomenológica fue la forma como Maxwell influenciado por Faraday, a partir de experimentos de carga por inducción, dio cuenta de la teoría de campo como medio de propagación de la acción eléctrica, Maxwell analizó sus experimentos sin preconceptos los cuales podrían haber distorsionado su visión natural de la realidad.

Se tiene entonces, que la difracción es un fenómeno que está presente en varios eventos de la naturaleza y se puede producir en un laboratorio, pero este fenómeno es poco comprendido por los estudiantes; su estudio desde un enfoque fenomenológico permite comprender algunos conceptos básicos inherentes al fenómeno y la forma de elaborar una estructura experimental básica, acorde con la aproximación al fenómeno desde el principio de Huygens-Fresnel, por tanto, surge la siguiente pregunta.

METODOLOGÍA

El fenomenólogo logra profundizar y observar ampliamente la realidad no para describir la situación sino más bien como un acto de interpretación que es completamente subjetivo, los sentidos están presentes, la reflexión y la búsqueda de hipótesis sobre el comportamiento del fenómeno. En el transcurso de los tiempos los hombres se han cuestionado sobre la forma como funciona la naturaleza y el universo para comprenderlos mejor y así poder actuar sobre ellos, en beneficio de una comunidad o cultura, así nacen las inquietudes que llevan al científico a hacer una investigación del fenómeno.

La Génesis de la inquietud fenomenológica, una inquietud es algo que mueve al ser, un intento por querer descubrir y trascender más allá de los propios conceptos, incluso una cualidad de la fenomenología es despejarse de los criterios propios y entrar en un terreno que el mismo fenómeno se develará conforme el investigador se adentra en él (Guerrero et al., 2016).

Se puede decir que el origen de un planteamiento fenomenológico puede tener dos caminos: uno epistemológico (la razón de conocimiento del fenómeno) y otro ontológico (la razón de la naturaleza de la realidad) el primero relacionado con los principios del conocimiento, así como los medios que conllevan a ese conocimiento, la bifurcación de ese conocimiento en el tiempo y los métodos que llevaron a ese conocimiento. El otro es el estudio de todo lo existente, que considera cuestionamientos metafísicos, más abstractos sobre el origen del universo.

Debido a que los fenómenos cuya principal característica es la luz son llamativos para los estudiantes, se propone la elaboración de una *guía de experimentos básicos sobre difracción de la luz* (**Ver Anexo 1**) se debe tener en cuenta que esta es pensada y planeada teniendo como fundamento el enfoque fenomenológico, lo que permite que los estudiantes puedan explorar y construir la experiencia sensible desde la elaboración de los materiales por ellos mismos, lo cual requiere, escoger materiales correctos, desarrolla la creación de diseño de instrumentos, técnicas de manipulación de materiales; hasta el momento en que se configuran los diferentes instrumentos de la manera correcta para poder observar el fenómeno, lo que requiere, ajustes en los montajes, método de ensayo y error, pensar en las posibles soluciones a los problemas presentados durante el montaje, todo esto permite la ampliación de la experiencia a partir de la organización de un conjunto de cualidades que muestra el fenómeno y que llevará a la ampliación y la construcción de la fenomenología de la difracción de la luz.

Por otro lado, la *guía de experimentos básicos sobre difracción de la luz* también fue pensada y elaborada teniendo como una de sus banderas la construcción del fenómeno de difracción de la luz desde el *principio de Huygens-Fresnel* o que el fenómeno se pudiera comprender desde este principio; esto se logra desde la *teoría de las zonas de Fresnel* para dar cuenta del principio, sobre todo, con obstáculos o aberturas con simetría circular como son los casos del disco de Airy y el punto de Poisson los cuales son tratados desde la difracción por *zonas de Fresnel*, la cual a su vez se sustenta en el principio de Huygens-Fresnel. De igual modo, la difracción a través de una única rendija o por doble rendija como es el caso del experimento de Young se fundamentan ambos, si bien no es por *zonas de Fresnel*, si es desde la teoría de Fraunhofer o de campo lejano la cual también se sustenta en el principio de Huygens-Fresnel.

Hay un caso que en mi opinión resulta de especial importancia, es la difracción a través de un alambre fino, donde fácilmente se puede visualizar la interferencia y el patrón de difracción el cual se fundamenta una vez más desde la teoría de Fraunhofer o de campo lejano y este se sustenta en el principio de Huygens-Fresnel.

Como primer antecedente se cuenta con el trabajo *Diseño de prototipos experimentales orientados al aprendizaje de la óptica* de Eliexer Pérez, el cual pone de manifiesto que desde los años 60s se ha visto el interés de varios académicos y sociedades internacionales en proponer planeamientos y métodos para incrementar la motivación y el resultado de los estudiantes de básica secundaria, sobresaliendo los métodos experimentales en el desarrollo de conceptos en ciencias naturales y física, y la existencia de una esencial relación entre teoría y experimento (Eliexer & Nelson, 2009).

Se plantea, que las demostraciones experimentales de cátedra desarrolladas en el aula son un complemento para las actividades de laboratorio y no las reemplazan, son una ayuda para

estructurar un problema, ya que algunos de los prototipos usados arrojan errores de medición por los materiales utilizados. Se pueden utilizar los prototipos para demostraciones de cátedra antes de abordar un tema, con el fin de que los estudiantes interpreten cómo opera un determinado principio físico inherente al fenómeno, en relación con la teoría y las actividades de laboratorio. De igual modo, las demostraciones experimentales sirven para que los estudiantes perciban que la Física es una Ciencia Natural y que las teorías se fundamentan en las respuestas que la naturaleza concede a las preguntas (Eliexer & Nelson, 2009).

Se destaca que, si el docente en colaboración con los estudiantes construye algunos dispositivos o prototipos experimentales con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo, esto le permitiría desarrollar algunas demostraciones experimentales didácticas, incluso si la institución educativa no está abastecida de laboratorio con instrumentos actualizados. Se comenta de la dificultad que suscita el desarrollo de experimentos, con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo, para la enseñanza de las ciencias y de la óptica, debido a la falta de un manual y su validación previa por un experto, además, no es sencillo la reproducción de dispositivos experimentales por parte de estudiantes que no cuenten con una preparación previa básica en actividades de investigación (Eliexer & Nelson, 2009).

Se mencionan tres etapas I. Diseño del prototipo y manual del docente, II. Validación del manual y III. Empleo y determinación de su efectividad en el aula. En la etapa I se seleccionan los conceptos y constructos teóricos relevantes en forma creciente de complejidad, se piensan o proponen prototipos experimentales que exhiban estos fenómenos y conceptos, y se seleccionan los que su construcción y diseño sean viables con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo. Para garantizar la idoneidad del prototipo de trascendencia conceptual, se continúa con la validación del prototipo y su manual etapa II por el método de criterio de expertos (test de Likert),

en la etapa III se implementa en el aula para efectuar ajustes al diseño y a las técnicas de instrucción en el empleo de cada prototipo (Eliexer & Nelson, 2009).

Como segundo antecedente se tiene el trabajo *Propuesta didáctica basada en la Metodología de Aprendizaje Activo, encaminada a construir el concepto de difracción partiendo de prácticas experimentales* de Carolina Manrique, aquí se plantea construir el concepto de difracción a través de prácticas experimentales en el aula en el grado undécimo, se cita que la difracción es un fenómeno ondulatorio que ha contribuido a la creación de nuevas teorías y estudios, y que el trabajo en el aula se restringe a la transmisión tradicional de información enciclopédica faltando la parte experimental. A la óptica ondulatoria se le dedica de trabajo en el aula un 1%, se ejecuta trabajo solamente teórico lo que lleva a una construcción conceptual insuficiente o nula, la actividad experimental es casi nula y las pocas veces que se ejecuta no se destina a esclarecer conceptos sino a la comprobación de teorías (Torres, 2012).

Además, en este trabajo se comenta de la falta de motivación de maestros y estudiantes para crear estrategias de enseñanza-aprendizaje de las ciencias naturales y principalmente de la física, y se exponen las posibles causas de este problema como: la carencia o inexistencia de material o equipo experimental en los laboratorio de los colegios; la mayoría de los maestros no cuentan con la capacitación adecuada en el manejo de los equipos dirigidos a la enseñanza de la óptica ondulatoria; en el currículo no se considera el tiempo suficiente para trabajar al mismo tiempo los contenidos teóricos y experimentales, debido a una alta carga temática y poca intensidad horaria semanal; la falta de un acuerdo adecuado en matemáticas y física para concebir estrategias de enseñanza no permite una formación integral del estudiante; debido a que el docente no cuenta con la adecuada preparación ni motivación, cuando realiza una consulta bibliográfica no percibe los fallos de esta en aspectos metodológicos, conceptuales, etc. por lo que se restringe a entregar

información textualmente como aparece en los libros faltando una adecuada reflexión y crítica, lo que causa un aprendizaje de bajo nivel; dado que el docente en muchos casos no conoce las posibles aplicaciones del fenómeno de la difracción, esto es un obstáculo para motivar a los estudiantes en su estudio (Torres, 2012).

PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo se puede contribuir a la caracterización del fenómeno de difracción de la luz y a la comprensión del principio de Huygens-Fresnel por medio de la actividad experimental en el aula?

OBJETIVO GENERAL

Realizar una guía de actividades experimentales básicas sobre el fenómeno de la difracción de la luz para la comprensión del principio de Huygens-Fresnel desde un enfoque fenomenológico.

Objetivos Específicos

- Realizar la documentación respectiva de los aspectos disciplinares, experimentales, didácticos, de enseñanza-aprendizaje e históricos del fenómeno de la difracción.
- Establecer los conceptos viables a abordar para la elaboración de la guía referentes al fenómeno de la difracción y al principio de Huygens-Fresnel.
- Seleccionar aquellos experimentos que abarquen los conceptos establecidos y que sea posible realizarlos con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo.
- Construir los instrumentos necesarios con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo para llevar a cabo las actividades experimentales.
- Ejecutar las actividades experimentales propuestas.
- Redactar las reflexiones finales respecto del trabajo de investigación realizado.

1. CONTEXTO HISTÓRICO

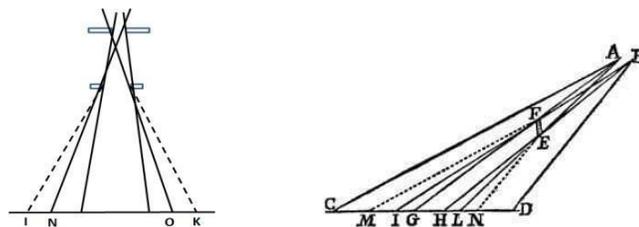
1.1 Breve Historia de la Difracción de la Luz

La cámara oscura es conocida desde los árabes, en este escrito se trata por la facilidad para percibir que la luz se propaga en línea recta con un adecuado diámetro de diafragma lo que encamina al concepto de rayo luminoso, y por el hecho que si se cierra más el diafragma la imagen se torna borrosa por la difracción. Alhacén escribió su libro de siete tomos *Kitab al-Manazir* (Libro de Óptica) fue el más seguido por los curiosos de las ciencias y fue el segundo libro de óptica de mayor extensión después del Almagesto de Ptolomeo. Su estudio era para comprender cómo se proyectaban las imágenes en el ojo, el estudio de la visión y de los rayos luminosos; se utilizaba para los debates sobre óptica propuestos y para discutir temas relativos a la esencia de la luz (Fraga, 2016).

La primera persona en observar el fenómeno de la difracción fue Grimaldi, él fue catedrático, astrónomo, además tenía virtudes para la investigación y la experimentación encaminando su búsqueda para dar cuenta de la naturaleza de la luz. Realizando una esmerada investigación sobre fenómenos luminosos en la década de 1660 Francesco María Grimaldi (1618-1663) diseñó su experimentación a modo de investigación y trató de construir un fenómeno, sin embargo, dudaba sobre la naturaleza de la luz, pero tenía algunas ideas como que las franjas coloreadas se formaban por una radiación que se produce al incidir la luz en el agujero y formaba algunos supuestos conceptuales como “*obtener oscuridad sumando luz*”, ya estaba hablando de interferencia pero sólo eran suposiciones sin conseguir profundizar en teorías, también construyó un lenguaje para referirse al fenómeno ya que instauró la palabra difracción que deriva del latín *diffractum* que significa acción y efecto de quebrar en diferentes direcciones (Bravo & Pesa, 2015).

Grimaldi solicitó montar un cuarto oscuro, abrió un pequeño agujero circular en una pared y dejaba entrar un rayo de Sol, luz blanca o amarilla, hacia el fondo del cuarto la cual incidía en otra pared y observando se dio cuenta que la mancha en la pared era más grande en la práctica que si hacia el cálculo geométrico. Abrió otro agujero y dejó pasar el haz por este (*Fig.1*), con este segundo agujero se dio cuenta que la mancha en el centro era blanca y alrededor tenía franjas de colores, refirió lo visto así “La luz incidente...iluminará una base IK notablemente mayor que la que los rayos debieran iluminar si fueran transmitidos en línea recta a través de dos agujeros...la base iluminada IK aparece bañada en el medio con luz pura y, en cada extremidad, su luz es coloreada” (Grimaldo, 1665, como se citó en Castañeda, 2012, p. 52).

Figura 1. *Diagramas de Grimaldi*



Nota. Describir la difracción. Izquierda, por un segundo orificio alineado con el primero. Derecha, por un delgado alambre. Reproducida de Esquema de Grimaldi, Román Castañeda, 2012, <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/download/49003/50073/239233>.

A su vez interpuso un delgado alambre entre el haz que entraba por el orificio y la pared (*Fig.1*) encontrando que entrando el haz por el agujero AB e incidiendo en el obstáculo FE se observó oscuridad total en la zona GH, penumbra en las zonas GI y HL, y en las zonas MC y ND aparecen franjas luminosas alternadas con centro blanco que se tornan coloreadas en sus laterales (Castañeda, 2012). Franjas de luz en la sombra del alambre y franjas de colores externas a la sombra, el color azul se hallaba más cercano a la sombra mientras que el rojo más alejado. Grimaldi trazó los cálculos geométricos y encontró que la luz se desviaba de su trayectoria rectilínea al

incidir sobre obstáculos o agujeros pequeños, en aquella época se conocía la desviación de un rayo por reflexión y por refracción, con lo cual concluyó que era un fenómeno diferente a estos dos.

Abrió un segundo agujero en la pared cercano al otro de tal manera que los rayos al entrar por los agujeros e incidir en la pared se superponían por la parte central, observó que la zona donde se superponían era más oscura que con un solo agujero abierto. Grimaldi no se inclinó hacia alguna teoría, pero en sus comentarios decía que eran otros rayos los que formaban las franjas y que la luz se sumaba a otra luz para producir franjas oscuras; estas ideas influyeron en los pensamientos de Christian Huygens (1629-1695) cuya influencia hizo que negara la desviación de la luz por refracción propuesta por Newton, así mismo, el *Propositio I, N.21* de Grimaldi lo orientó a desarrollar una teoría de la luz en representaciones de ondas de presión que se propagan en un fluido llamado éter y la construcción geométrica de propagación de las ondas luminosas, esto estaba fundamentado con sus experiencias en astronomía al trabajar con lentes y espejos que él mismo tallaba . El trabajo de Huygens sobre la luz se publicó en 1690 como *Traité de la Lumière* hecho al mismo tiempo que Römer investigaba la velocidad finita de la luz (Castañeda, 2012; Gribbin, 2001).

La concepción de corpúsculos ya mantenía 2000 años afianzada desde que Demócrito concedió al universo una constitución atómica (Castañeda Sepúlveda, 2012). Por otro lado, Robert Hooke (1635-1703) publicó una *Micrographia* que trata de la observación y descripción a través de un microscopio que construyó él mismo e investigaciones sobre fenómenos luminosos, en estas observaciones se dio cuenta de la existencia de luz en la sombra geométrica de un objeto y fue el primero en adoptar un punto de vista ondulatorio diciendo que la luz se compone de veloces vibraciones en el éter perpendiculares a su trayectoria de propagación, cada vibración forma una esfera y esta se propaga instantáneamente o a una enorme velocidad.

Entonces, cuando la luz pasa por los bordes de un obstáculo o un agujero se desvía de su trayectoria rectilínea, además la luz sufre una dispersión, los colores se desvían en diferentes grados conformando una imagen parecida al arcoíris. Grimaldi consideraba que los rayos de luz estaban compuestos por delgadas barras compuestas de un flujo de pequeñas partículas luminosas, cuando la luz incide en los bordes de un objeto esta se fracciona en una disposición de otras barras luminosas formando las franjas observadas (Castañeda Sepúlveda, 2012).

Por el mismo tiempo el escocés James Gregory (1638-1675) cerca del año 1660 realizaba trabajos sobre óptica encontró que, obstruyendo el haz con una pluma de pájaro la luz que atravesaba la pluma se proyectaba en la pared opuesta con una mancha blanca y colores alrededor, ésta se cree que es la originaria rejilla de difracción.

El principal fundamento de que la composición de la luz eran partículas era las sombras evidentes que proyectan los objetos, Newton al mismo tiempo que realizaba sus experimentos sobre la dispersión de un rayo por un prisma, también se mantenía informado de los experimentos de sus contemporáneos Grimaldi, Gregory y Hook. Sin embargo, Newton decía que cerca al orificio o al obstáculo el éter tenía una distribución más densa por lo que los haces se desvían por refracción.

Grimaldi no pudo mostrar que la luz sumada a la luz producía oscuridad, por el hecho que usaba luz blanca y en esa época no se conocía la coherencia de la luz o los láser. En el s. XIX Thomas Young (1773-1829) si bien ejerció la medicina eso no fue obstáculo para continuar haciendo aportes a la ciencia. Repitió el experimento de Grimaldi de los dos agujeros cercanos añadiendo un agujero antes y alineados con los otros dos, de manera que la cantidad de ondas que incidían en los dos agujeros se reducía, encontrando así franjas oscuras en la zona central donde se superponen ambos rayos en la pared, franjas que Grimaldi no pudo observar, además propuso

como ya lo había hecho Euler que los colores se debían a distintas longitudes de onda y calculó con los datos experimentales de Newton la longitud de onda del color rojo y violeta (Castañeda Sepúlveda, 2012). El laboratorio que propicia observar estos fenómenos consistía en una habitación totalmente oscurecida y luz natural que ingresa primero por una pequeña ranura y luego por otras dos.

En la primera mitad de la década de 1800, Young presentó sus trabajos ante la Royal Society, incorporando el *principio de interferencia*, como explicación a las franjas observadas en el experimento de la doble rendija con la modificación que hizo del original de Grimaldi. Las ondas luminosas en el éter se refuerzan o se anulan, añadiendo así un nuevo concepto a la teoría ondulatoria, surgió entonces como una hipótesis que trataba de explicar el fenómeno de la difracción (Castañeda Sepúlveda, 2012).

En su investigación Young alumbró una delgada banda de cartulina por ambos costados y observó franjas brillantes y oscuras en la sombra que proyectaba, interpuso una pantalla negra bloqueando los rayos de un lado de la cartulina y observó que las franjas en la sombra desaparecían inmediatamente, de donde concluyó que las franjas se debían a la afluencia de los rayos que provenían de ambos lados de la cartulina.

Sin embargo, el experimento de Young que comprobaba que la luz tenía naturaleza ondulatoria fue rechazado por el círculo de científicos de su país Gran Bretaña y por la Royal Society, por el hecho que sus propiedades eran opuestas a las concepciones que le confería Newton, ellos pensaban que un rayo de luz superpuesto a otro rayo de luz era ilógico que produjera oscuridad. Pero, esto no fue problema, porque desde Francia llegaron nuevas pruebas que respaldaban la teoría ondulatoria, Augustin Fresnel (1788-1827) fue ingeniero civil a la vez que tenía afinidad con la óptica, aparentemente Fresnel no tenía conocimiento de los trabajos de Young

ni tampoco de los de Huygens y Euler, por lo tanto, forjó su modelo ondulatorio empezando de cero. Realizaba experimentos sobre la difracción de la luz y desarrollaba una teoría matemática ondulatoria que permitiera explicar sus observaciones. Con estos elementos Fresnel pudo calcular patrones de difracción producidos por obstáculos y aberturas y explicó la propagación rectilínea de la luz en medios homogéneos.

En 1817 la Academia Francesa brindó un premio a quien proporcionara el mejor trabajo experimental sobre la difracción y lo justificara con un modelo teórico que explicara los efectos. Fresnel presenta su trabajo, notando el gran obstáculo por superar, ya que los jueces del concurso, Simeón Poisson, Jean Biot y Pierre Laplace, eran newtonianos partidarios del modelo corpuscular y buscaron errores en la teoría (Gribbin, 2001).

Poisson estudió cuidadosamente los tratamientos matemáticos de Fresnel, realizó estrictos cálculos y afirmó encontrar una discrepancia. La teoría de Fresnel mostraba que si un pequeño balín se interponía al haz luminoso debería aparecer una pequeña mancha de luz en el centro de la sombra proyectada por el balín, justo en la zona donde debería haber más oscuridad. Este hallazgo les pareció ilógico, por lo que resolvieron acudir al fallo experimental (Gribbin, 2001).

El presidente del jurado, el experimentalista François Arago (1786-1853), amigo y simpatizante de Fresnel, realizó el experimento y encontró que el punto luminoso apareció justamente donde Poisson había pronosticado. Los resultados fueron notificados en 1819, con lo cual se concedió el premio a Fresnel. A partir de este momento quedó demostrado que Newton estuvo en una equivocación y que la luz tenía naturaleza ondulatoria (Bravo & Pesa, 2015).

1.2 Teorías de Newton y Huygens

Terminando el s. XVII existían tres hipótesis sobre la esencia de la luz: la corpuscular, la de ondas longitudinales y la de ondas transversales, las tres residían dentro del pensamiento mecanicista de la época el acontecimiento era percibido como materia y movimiento. Las refutaciones a la teoría ondulatoria eran: si las ondas sonoras pueden doblar esquinas y obstáculos y la naturaleza de la luz es ondulatoria ¿por qué la luz no dobla esquinas y obstáculos? entonces se pensaba que la luz no podía ser de naturaleza ondulatoria. Por otro lado, la teoría corpuscular no podía explicar:

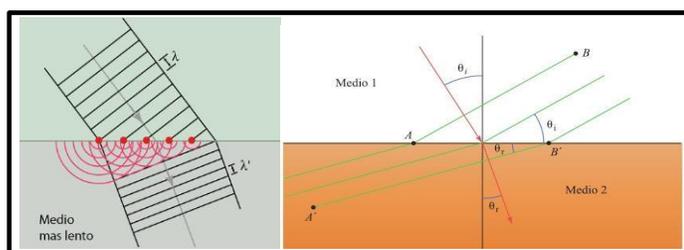
Que la luz se cruce sin que las partículas se destruyan, no se podían imaginar las partículas sin masa, que el objeto que emana luz no pierde peso y el que la recibe no lo gane, ¿por qué unas partículas al incidir en una superficie se reflejan y otras se refractan? no podían imaginar que las partículas se atrajeran y repelieran al mismo tiempo, ¿por qué los rayos de distintos colores viajan a la misma velocidad? ya que por la masa su velocidad debe ser mayor en las partículas pequeñas, la teoría de partículas no podía explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización. También, que al superponerse dos rayos se produjera oscuridad, ya que en esta teoría dos rayos de luz superpuestos aumentan la densidad de partículas lo que conlleva a una zona de mayor intensidad.

Había un procedimiento experimental para saber cuál de las dos teorías predecían mejor la realidad según sus hipótesis, ambas teorías, la de Newton y la de Huygens, debían dar cuenta porque en la refracción un rayo de luz al entrar al agua se aproxima a la normal. En aquella época ya se conocían los fundamentos de la óptica geométrica, Willebrord Snellius (1580-1626) había expuesto en 1621 la ley de la refracción de la luz, acorde con Huygens como la luz es ondulatoria obedecía la ley de Snell

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{V_i}{V_r}$$

V_r es la velocidad en el medio donde se refracta y V_i es la velocidad en el medio donde se refleja. Para que se satisfaga la ley de Snell, que el ángulo r sea menor que el i , la velocidad en el medio 2 debe ser menor. En virtud de la teoría ondulatoria, la velocidad es menor en el agua y el haz debe aproximarse a la normal al ingresar en el agua (*Fig.2*).

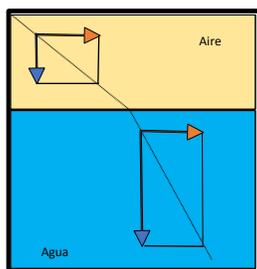
Figura 2. Refracción de la luz según Huygens



Nota. Reproducida de Principio de Huygens, Carl R. Nave, 2010, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>. (© C. R. Nave,2010).

De acuerdo con la teoría corpuscular, el haz, al aproximarse a la superficie del agua experimenta una atracción gravitatoria sobre la componente vertical que la incrementa (*Fig.3*), en tanto que la horizontal no se modifica, el efecto es una mayor velocidad total en el agua, la velocidad de la luz en el agua era mayor para la teoría de Newton. El experimento que solucionaría el debate radicó en calcular las velocidades de la luz, en aquel tiempo la teoría corpuscular ya no tenía mucha fuerza y acabó de colapsar cuando Arago, Foucault y Fizeau consiguieron evidenciar experimentalmente en 1850 que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el aire, opuesto a lo que pronosticaba la teoría corpuscular.

Figura 3. Luz al transitar de aire a agua según la teoría de Newton



La teoría corpuscular de la luz era explicada mediante un flujo de partículas sin masa que se propagan a gran velocidad lo que admite que traspasen cuerpos translúcidos, Newton había logrado exponer las características de los colores en 1666 al partir un haz de luz blanca mediante un prisma, hallando que cada color es debido a una refracción determinada.

2. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

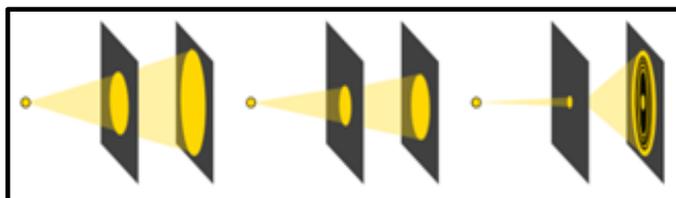
2.1 Diferencia entre Óptica Geométrica y Óptica Física

La óptica es la rama de la física que investiga la luz, esta se divide en tres cada una con un método teórico distinto: 1. óptica geométrica: concibe la luz como rayos; 2. óptica física: concibe la luz como ondas; 3. óptica cuántica: concibe la interacción de la luz con las partículas atómicas. Estas tres ramas se califican como macroscópico, microscópico y atómico (Jenkins, 1964).

La diferencia entre óptica geométrica y óptica física se logra al procurar aislar, por medio de un agujero, un único lápiz de luz. Una fuente puntual ilumina el agujero, la luz pasa por el agujero proyectando en una pantalla la forma geométrica del agujero, esta es una prueba de la propagación rectilínea de la luz (*Fig.4*). Si el agujero se cierra más el lápiz de luz que llega a la pantalla se vuelve más estrecho, entonces cabría la posibilidad de aislar un único lápiz muy fino de luz. Pero acontece, que si se cierra aún más el agujero a partir de un determinado límite el lápiz luminoso en vez de hacerse más estrecho se hace más ancho al atravesar el agujero. De lo anterior se aprecia el concepto de rayo luminoso, dicho concepto es válido siempre y cuando los obstáculos

o aberturas con los cuales incide la luz no sean demasiado pequeños, pues de lo contrario la luz se expande y dejaría de ser un rayo.

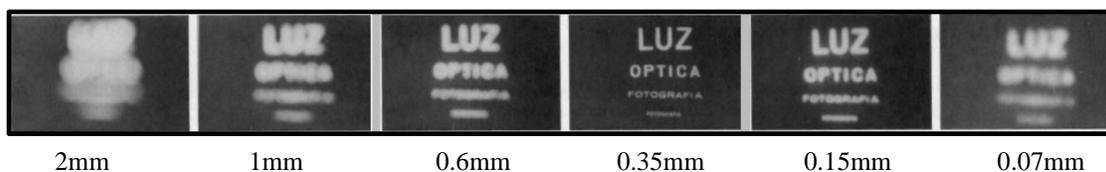
Figura 4. *Distinción entre óptica geométrica y la óptica física al intentar aislar un rayo luminoso*



La incapacidad de aislar un rayo luminoso muy fino se debe al fenómeno denominado difracción que describe además la poca nitidez de la orilla de una sombra proyectada por un objeto. La difracción es efecto de la naturaleza ondulatoria de la luz y solo obtiene relevancia cuando se examinan fenómenos a pequeña escala, como al emplear un agujero muy pequeño o al examinar la orilla de una sombra con una lupa (Jenkins, 1964).

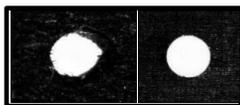
Se puede verificar la propagación rectilínea de la luz en una cámara oscura cuando la luz atraviesa un pequeño agujero (estenopo) hacia su interior, se aprecian imágenes invertidas y dinámicas proyectadas sobre la pared opuesta. Si el estenopo es menor de 0.35mm la imagen se visualiza de forma desenfocada y borrosa debido a la difracción (Fig.5), inclusive las imperfecciones de los bordes en su perímetro reducen la calidad de la imagen (Fig.6).

Figura 5. *Enfoque de la imagen de una cámara oscura*



Nota. Según el tamaño del estenopo, si es $< 0.35\text{mm}$ se desenfoca debido a la difracción. Reproducida de Enfoque de la imagen de una cámara oscura, 1987, Hecht, <https://riunet.upv.es/handle/10251/76568>.

Figura 6. *Estenopos*



Nota. A) Estenopo elaborado con una aguja. B) Estenopo elaborado con un láser. Reproducida de La perforación de una aguja y un láser en un trozo de cartón, 1987, Hecht, <https://riunet.upv.es/handle/10251/76568>.

2.2 Ondas Sonoras, de Radio y de Luz

El sonido tiene carácter ondulatorio, por lo tanto, se difracta, las bajas frecuencias se pueden escuchar mejor alrededor de los obstáculos que las altas, un ejemplo de difracción es la diferencia entre el sonido de un rayo próximo y uno distante, un trueno próximo tiene un sonido nítido agudo lo que muestra la existencia de ondas de alta frecuencia, el trueno distante tiene sonido grave, pues las longitudes de ondas largas pueden doblarse alrededor de los obstáculos hasta llegar a nosotros.

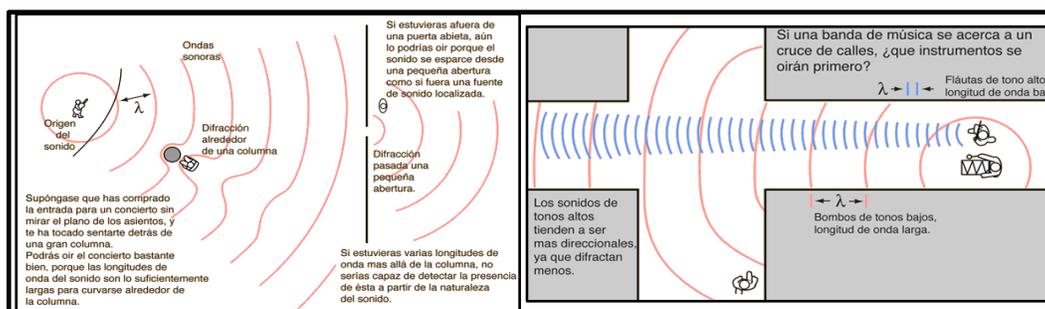
Otro ejemplo son los sonidos de las sirenas de niebla que producen un sonido grave de longitud de onda larga, si hay grandes obstáculos de por medio las ondas largas pueden rodear los obstáculos lo cual permite que pueda ser escuchado fácilmente por los barcos. La longitud de onda sonora en el espectro audible para el ser humano está entre 1.7 cm y 17 m y frecuencia entre los 20 HZ y los 20000 HZ, por esto, las ondas sonoras de un tambor, sonido grave menor a 250 Hz, doblan esquinas y rodean obstáculos en mayor grado que las ondas sonoras de un violín, sonido agudo mayor a 5000 Hz (*Fig.7*).

Igualmente ocurre cuando el sonido choca con una abertura, si la abertura es más grande que la longitud de onda sonora las ondas atravesarán la abertura en línea recta, si la abertura es más pequeña, esta se comporta como si fuera una fuente puntual de ondas y el sonido se dispersa al otro lado de la abertura (*Fig.7*), los sonidos se difractan por las aberturas de las puertas llegando

a los puntos ciegos donde pueden ser escuchados por un receptor. Si las ondas sonoras tuvieran una longitud de onda demasiado pequeña como las de la luz visible, probablemente no se escucharía sonidos en el interior de un cuarto cerrado o no podríamos escuchar a una persona separada por un obstáculo como un pequeño muro.

Las ondas de radio AM cuya longitud de onda esta entre los 100m a 1000m pueden bordear fácilmente obstáculos como postes, árboles y montañas, mientras que las ondas FM cuya longitud de onda esta entre 1m a 10m no pueden bordear obstáculos como las montañas, por esto las emisoras AM cubren lugares entre valles y montañas en tanto que las señales de FM no llegan a estos lugares. Por otro lado, las señales de onda de telefonía, internet y satelitales, cuya longitud de onda es menor a las anteriores, requieren de altas torres para transmitir la señal en línea recta y sin obstáculos, ya que cualquier obstáculo distorsiona la señal debido a que las ondas no se pueden difractar o bordear los objetos.

Figura 7. Difracción del sonido



Nota. A) A través de una columna y una abertura. B) Las ondas largas de un tambor se difractan mejor que las ondas cortas de las flautas. Reproducida de Difracción del Sonido, Carl R. Nave, 2010, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>. (© C. R. Nave,2010).

En las ondas de luz es difícil observar la difracción a simple vista, la luz no dobla obstáculos, no se esparce a través de aberturas y no dobla esquinas, por lo menos, este hecho es evidente si la luz choca con objetos más grandes que su longitud de onda, este hecho se evidencia por las sombras que proyectan los objetos. Pero ¿qué sucede si la luz incide sobre cuerpos

microscópicos como los observados a través de un microscopio? Esto es un problema para los científicos que quieren observar objetos muy pequeños, ya que la luz usada se difracta y se curva a través del objeto que se quiere observar lo cual impide su visualización. Sin embargo, algunos microscopios utilizan luz de longitud de onda corta como la luz azul o ultravioleta para impedir la difracción. Ahora se usan microscopios electrónicos que emplean electrones para observar imágenes de objetos diminutos, esto es debido a que el haz de electrones tiene comportamiento ondulatorio con longitud de onda muy inferior a la de la luz visible, este caso es importante pues este haz de electrones no se difracta alrededor de cuerpos microscópicos y permite observar objetos aún mucho más pequeños.

2.3 Difracción de Fraunhofer por una Rejilla

Varias rendijas dispuestas todas paralelas, todas de igual ancho y separadas una de la otra la misma distancia, esta configuración se llama *rejilla de difracción*. De cada rendija emergen ondas y estas se superponen generando un patrón de difracción.

Si el número de ranuras crece conservando constante la distancia entre ranuras contiguas, los máximos surgen en la misma posición que con dos ranuras con la misma separación, pero, a medida que aumenta el número de ranuras los máximos se tornan más brillantes y angostos. Si N es la cantidad de ranuras entonces entre los máximos principales aparecen $(N-2)$ pequeños máximos secundarios y $(N-1)$ mínimos secundarios (Silvester, s.f.).

Los máximos secundarios se desvanecen a medida que N aumenta hasta comúnmente extinguirse con $(N=20)$ ranuras. Haciendo una revisión de la energía la potencia del patrón es proporcional a N , la altura de los máximos es proporcional a N^2 como resultado por conservación de la energía el ancho de los máximos debe ser proporcional a $1/N$ (Silvester, s.f.). A la distancia entre los centros de las rendijas se le llama *constante de la rejilla*.

Los máximos se forman de la misma forma que en una única rendija donde d es la constante de la rejilla, es decir

$$\text{sen } \alpha = m \frac{\lambda}{d} \quad m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Si el rayo que incide sobre la rendija es de luz monocromática al otro lado se forman imágenes de la rendija del mismo color, si el rayo está compuesto de varias longitudes de onda (luz blanca) se forman varias imágenes de rendijas de varios colores, cada longitud de onda es desviada un ángulo diferente, en contraste con el único espectro formado por un prisma. Para $m=1$ espectro de primer máximo, para $m=2$ de segundo, y así sucesivamente, en el centro de la pantalla para $m=0$ los rayos de colores se juntan causando una banda central blanca.

Cuando la pantalla donde se forma el patrón esta cercana a la abertura u obstáculo se llama difracción de Fresnel o de campo cercano, si la pantalla se encuentra muy lejos de la abertura u obstáculo se llama difracción de Fraunhofer o de campo lejano, en la cual los rayos que emergen de la rejilla se consideran todos paralelos e inciden en un punto sobre la pantalla.

Existe una regla para poder hacer una diferenciación entre ambos modelos matemáticos usando el número de Fresnel

$$F = d^2 / L\lambda$$

Donde d es el ancho o radio de la apertura, L la distancia de la apertura a la pantalla. Si $F \ll 1$ se considera válida la aproximación de Fraunhofer y si $F \gg 1$ se considera la de Fresnel.

En el año 1678 Huygens publicaba a la comunidad científica su teoría ondulatoria la cual se basa en una máxima que lleva su nombre, el *Principio de Huygens*, a la vez, este principio surgió al escribir su libro *Traité de la Lumière* y realizar sus propias prácticas de laboratorio. Mas adelante Fresnel instaura el principio de Huygens-Fresnel que se caracteriza por dar una explicación a la difracción teniendo como base el principio de Huygens y el principio de

interferencia descubierto por Tomas Young, los cuales permiten a Fresnel presentar una teoría de la difracción.

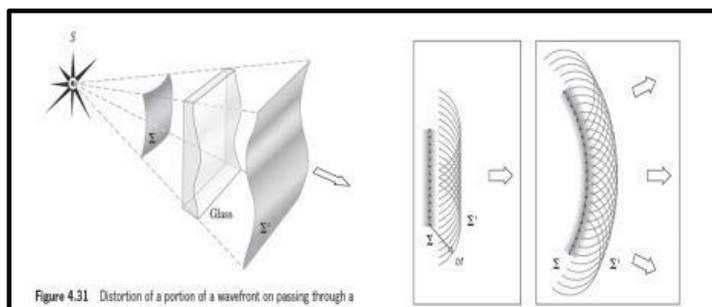
Un asunto para destacar es que Huygens consideraba que todo frente de onda primario desplazándose en el espacio estaba formado por ondas secundarias, según él, esta era la forma como avanzaba un frente de onda. Para visualizar mejor este hecho (*Fig.8*) se muestra un frente de onda principal Σ' formado por una cantidad de pequeñas onditas producidas en Σ un instante anterior.

Ahora supongamos que se hace incidir un frente de onda sobre una hoja de vidrio no uniforme (*Fig.8*) al atravesarla el frente de onda se distorsionará *¿Qué forma tendrá éste nuevo frente de onda?* Nosotros podríamos pensar inmediatamente que los rayos se difractan en diferentes direcciones al salir del vidrio y representar el frente de onda como perpendicular a todos los rayos. La solución a este problema tuvo su aproximación en 1690 en el trabajo *Traité de la Lumière* escrito por el holandés Christian Huygens, desde ese momento fue que se enunció el principio de Huygens:

Cada punto de un frente de onda primario sirve como foco de ondas esféricas secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a las de la onda primaria. El frente de onda primario al cabo de un cierto tiempo es la envolvente de estas ondas elementales (Tipler & Mosca, 2010, p.1059).

Es decir, la onda al incidir en la interfaz aire-vidrio o viceversa, en la vecindad de la interfaz hay una discontinuidad, es allí en cada punto de la interfaz donde se forman focos emisores de nuevas ondas, todas estas ondas al salir del vidrio forman la envolvente del frente de onda principal

Figura 8. Propagación de un frente de onda



Nota. Derecha, propagación de un frente de onda según Huygens. Izquierda, distorsión de un frente de onda al pasar a través de un material no uniforme. Imagen Fuente: Christiaan Huygens, 1690, *Traite de la Lumière*.

Para Huygens las perturbaciones se describían como ondas mecánicas en un medio elástico que todo lo llenaba, el éter. Según dice él:

Cada partícula de materia por la cual prosigue la onda no solamente comunica su movimiento a la partícula que le sigue, la cual está en línea recta trazada desde el punto luminoso, sino también que necesariamente da movimiento a todas las otras que la tocan y que se oponen a su movimiento. El resultado es que alrededor de cada partícula aparece una onda de la cual esta partícula es el centro.

Según el último enunciado habría que hacer una reformulación del principio de Huygens pues las ondas aquí se ilustran como hemisféricas hecho que puede explicar el caso de la difracción después de atravesar un obstáculo. Pero, si las ondas secundarias se ilustrarán como circunferencias, una parte del frente de onda se desplazaría hacia la fuente y produciría un patrón de difracción algo que no ha sido observado. Esta dificultad fue revisada teóricamente por Fresnel y Kirchhoff, Fresnel introduce un factor de oblicuidad¹ para la intensidad de la radiación de las ondas secundarias, con lo cual pudo resolver por qué las ondas de Huygens no irradiaban hacia la parte de atrás del obstáculo.

¹ En el anexo 2 se describe este factor.

El principio de Huygens pudo ser un punto de partida de la teoría de dispersión de la luz por partículas de Lord Rayleigh (1842-1919) por ésta razón su estabilidad en el tiempo y la importancia que se le da aún en estos tiempos, la teoría de Rayleigh para la reflexión y refracción dice que si una onda incide en una interfaz entre dos medios, como al pasar de aire a vidrio, en esta línea de discontinuidad la onda perturba los átomos sobre la interfaz, los átomos generan nuevas ondas una parte se refleja y la otra se transmiten al vidrio.

Igualmente ocurre cuando un frente de onda es obstruido por un obstáculo cada uno de los puntos sobre el frente de onda se consideran focos emisores de nuevas ondas las cuales interfieren más allá del obstáculo generando un patrón de difracción, este hecho se puede observar cuando se ilumina un pequeño objeto como es el caso de un fino alambre. En sus experimentos Fresnel iluminó un delgado alambre donde su sombra se proyectaba en un vidrio esmerilado, y por la parte de atrás del vidrio, observaba con una potente lupa la luz que se extendía en ambos costados de la sombra, iguales en ambos lados.

2.4 Observaciones Experimentales de Fresnel

En los trabajos experimentales de Grimaldi, Young y Fresnel se buscaba entre otras cosas obtener una fuente luminosa puntual, que no forme penumbra, para poder distinguir el límite entre luz y sombra, pues una fuente extensa forma una zona de sombra con penumbra. Para obtener un punto luminoso, Fresnel abrió un pequeño agujero en una lámina de aluminio e hizo incidir gran cantidad de luz sobre él, de modo que al salir la luz ésta se observa como si proviniera de un punto. Otro método es por medio de una lente convergente o una divergente, la luz incidente se concentra en el foco de la lente, en este caso el foco de la lente se considera como un punto luminoso. Con este método Fresnel obtuvo sobre la sombra franjas más nítidas, con una lente de 15 cm de distancia focal, siempre que el objeto cuya sombra se iba a observar estaba a más de cincuenta

centímetros del punto luminoso, cuando acercaba el objeto al punto luminoso, las franjas perdían nitidez (De Senarmont et al., 1866).

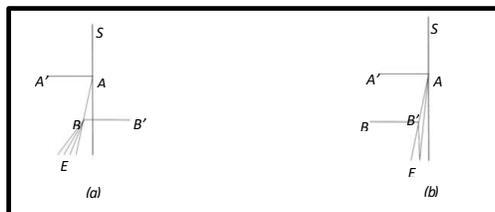
Usó un cable de un milímetro de diámetro, y en el interior de la sombra proyectada se observan franjas, y también se observan franjas exteriores fuera de la sombra, Fresnel midió la distancia entre las dos primeras franjas exteriores, proyectando la sombra sobre una tarjeta blanca o directamente sobre una lupa, tomando como referencia donde finaliza una franja de color rojo y donde comienza la otra de color violeta. Había comprobado antes, iluminando el delgado cable con haces de color rojo y luego de color violeta, que los violetas se desviaban menos y estaban más cerca de la sombra y los rojos más alejados de la sombra (De Senarmont et al, 1866).

También Fresnel observó la sombra producida por un obstáculo bajo la luz de una estrella, usó una lupa de 60 cm de foco en la cual se proyectaba la sombra, puso el obstáculo entre la estrella y la lupa a ocho metros de su foco, y vio la sombra del obstáculo con las dos franjas exteriores. Las fuentes incandescentes pequeñas o muy lejanas del obstáculo, por medio de las cuales los rayos luminosos llegan en un ángulo muy pequeño, como es el caso de la luz que proviene de las estrellas.

Lord Brougham físico inglés, presentó a la Academia de Ciencias, el 21 de enero de 1850, experimentos interesantes sobre la difracción de la luz, y los dio como inexplicables por las interferencias. A saber, uno de ellos fue la observación de una tenue luz que se propaga en la sombra de una pantalla, como una fuente de luz cuyos rayos provienen del borde de la primera pantalla, se ponen varias pantallas cada una invadiendo la sombra de la de arriba, el resultado es la formación de franjas de difracción (*Fig.9*) si el experimento se lleva a cabo correctamente. Sin embargo, la teoría de Fresnel ha resuelto tantas dificultades, que hoy es difícil dudar la interferencia de la luz.

Las dos pantallas AA' , BB' , dirigidas en direcciones opuestas, con sus bordes rectilíneos y paralelos, y de tal manera que el borde de la segunda pantalla entre en la sombra de la primera, se produce, más allá de la segunda pantalla, desde su sombra $B'BE$, una serie de franjas muy nítidas y notorias.

Figura 9. *Experiencia realizada por Lord Brougham*



Nota. A) una segunda pantalla entra en la sombra geométrica de la primera B) la segunda pantalla hace media revolución alrededor de su borde.

En el borde de la pantalla se pueden hacer algunas modificaciones experimentales, cambiando el material del borde de la pantalla por distintos metales (acero, plata, cobre, etc.) o hacer el borde más pulido con mayor filo o más redondeado. Los resultados de estos experimentos fueron descritos por (Gouy, 1886) donde se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En resumen, estos fenómenos complejos parecen ser el resultado de la superposición de los siguientes tres efectos: (1) Predominio de la radiación de onda larga ésta es más nítida si la desviación es mayor y el borde más redondeado; (2) alternancias de matices que varían con la desviación; (3) Predominio del color superficial del metal muy nítido como sería después de varias reflexiones. Estos tres efectos se producen con intensidades muy diferentes en diversos metales. Los cuerpos de acero y similares solo muestran el 1^{er} efecto, y con poca intensidad. La plata muestra el 1^{er} y 2^{do} efecto con gran intensidad. Los metales rojos o naranjas, en los cuales el 1^{er} y 3^{er} efecto es del mismo sentido, generalmente dan tintes rojos muy puros; El zinc, un metal azulado da tonos similares al azul los efectos 1^{er} y 3^{er} son de dirección opuesta, da sobre tonos marcados. Por lo tanto, el acero siempre da solo el tinte amarillento débil que se ha mencionado, el cobre

siempre da su tono rojo característico. Las franjas son aún más hermosas cuando el borde es más pulido, las irregularidades del borde impiden la difracción regular (Gouy, 1886).

2.5 Principio de Babinet

El principio fue enunciado por el francés Jacques Babinet (1794-1872), admitamos que I es un objeto de difracción, y I' es su complementario, o sea, un objeto que es translúcido donde I es oscuro, y oscuro donde I es translúcido. La superposición de los patrones de difracción originados por I y I' debe ser el igual que el de un haz sin obstrucción, los patrones de difracción causados por I y I' deben ser opuesta en fase, pero igual en intensidad. La distribución del patrón de difracción de un orificio circular es, así, opuesta a la del obstáculo complementario, que es un obstáculo opaco circular de las mismas dimensiones del orificio.

Por otra parte, el patrón de difracción generado por un objeto opaco debe ser idéntico al patrón de difracción generado por una abertura de la misma forma y tamaño del objeto opaco. Esto se cumple siempre y cuando el objeto opaco y la abertura tengan la misma forma y tamaño, y además sean igualmente iluminados. Si se tiene, por ejemplo, un alambre delgado, el caudal de luz que difracta este objeto es igual al caudal de luz difractada por una rendija de la misma forma y tamaño, de aquí se tiene que el total de luz difractada por un cuerpo negro es igual al total de luz que cae sobre su superficie y es absorbida.

2.6 Teoría de las Zonas de Fresnel sobre la Difracción de la Luz

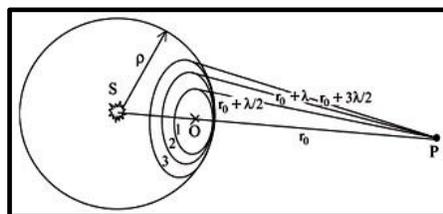
Posteriormente que Fresnel presentó su artículo sobre difracción en 1818 a la Academia Francesa de Ciencias se empezó a reconocer la teoría ondulatoria de la luz, se empezó a observar la interferencia y la difracción, así como la construcción de instrumentos ópticos para aplicarlos a la tecnología. Uno de los instrumentos es la placa de zona de Fresnel que fundamenta su funcionamiento en la difracción de la luz teniendo en cuenta el principio de Huygens-Fresnel. Las

placas son usadas en cámaras fotográficas, telescopios astronómicos y microscopios de rayos X, por su alta intensidad y transparencia a radiación electromagnética, también selecciona la radiación ya que las longitudes de onda son enfocadas a distintos alcances (Muller et al., 2005).

Esta práctica puede ayudar a los maestros, ya que es de fácil ejecución para los estudiantes y permite comprender la interferencia, la difracción y la teoría de zonas de Fresnel sobre la propagación de la luz.

El procedimiento radica en segmentar la onda esférica principal en anillos concéntricos denominadas *zonas de Fresnel*, estas zonas se definen de modo que las ondas secundarias que emergen de un anillo llegan en fase al punto P y la distancia al punto P de una zona superior aumenta progresivamente en $\lambda/2$ (Fig.10), de esta definición se observa que la radiación de dos zonas adyacentes llega al punto P con desfase de $\lambda/2$ (Muller et al., 2005).

Figura 10. Tres primeras zonas de Fresnel



Nota. Reproducida de Tres primeras zonas de Fresnel formadas por la intersección del frente de onda esférico generado en S con la superficie de tres esferas centradas en P cuyos rayos difieren de $\lambda/2$, Márcia Muller, 2005, https://pdfs.semanticscholar.org/238c/2c8d44fbd31ce640e073824b5e2575fa090b.pdf?_ga=2.83419094.1373544422.1647605328-177934577.1645152296

Sumando la intensidad de las zonas en el punto P como (Muller et al., 2005),

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \pm A_m \quad (1)$$

sin embargo, la intensidad en el punto P no es cero, pues la intensidad de cada zona va disminuyendo a medida que la zona está más alejada del centro de la placa.

Sí el número de zonas es *impar* se puede escribir la suma de las siguientes dos maneras (Muller et al., 2005):

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \dots + \left(\frac{A_{m-2}}{2} - A_{m-1} + \frac{A_m}{2}\right) + \frac{A_m}{2} \quad (2)$$

$$A = A_1 - \frac{A_2}{2} - \left(\frac{A_2}{2} - A_3 + \frac{A_4}{2}\right) - \left(\frac{A_4}{2} - A_5 + \frac{A_6}{2}\right) - \dots - \left(\frac{A_{m-3}}{2} - A_{m-2} + \frac{A_{m-1}}{2}\right) - \frac{A_{m-1}}{2} + A_m \quad (3)$$

Observando los términos entre paréntesis hay dos posibilidades para el valor de la magnitud de una *J-ésima* zona: A_J sea mayor que el valor promedio de sus vecinas o menor (Muller et al., 2005),

$$A_J > \frac{A_{J+1}}{2} + \frac{A_{J-1}}{2} \quad (4)$$

$$A_J < \frac{A_{J+1}}{2} + \frac{A_{J-1}}{2} \quad (5)$$

Las dos situaciones dependen de la tasa de variación del factor de oblicuidad $K(\theta)$, si la primera situación ocurre² los términos entre paréntesis de las ecuaciones (2) y (3) serán negativos por lo que se obtiene (Muller et al., 2005),

$$A < \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2} \quad (6)$$

$$A > A_1 - \frac{A_2}{2} - \frac{A_{m-1}}{2} + A_m \quad (7)$$

Dado que el factor de oblicuidad varía de 0 a 1, si tenemos un gran número de zonas se puede despreciar las variaciones de dos zonas contiguas aproximando $A_1 \approx A_2$ y $A_{m-1} \approx A_m$ la ecuación (7) se puede reescribir (Muller et al., 2005),

$$A > \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2} \quad (8)$$

² Note que en la segunda situación se llega al mismo resultado de la ecuación (9), es decir, la tasa de variación del factor de oblicuidad es irrelevante, se obtienen igual las ecuaciones (9) y (10). Lo importante es que la intensidad de zonas adyacentes es aproximadamente igual y es nula para una zona muy alejada del centro.

De las ecuaciones (6) y (8) podemos concluir que (Muller et al., 2005),

$$A \approx \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2} \quad (9)$$

Con el mismo proceder con número de zonas *par*³ se puede llegar al resultado (Ec.10) (Muller et al., 2005),

$$A \approx \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} \quad (10)$$

Al analizar las expresiones (9) y (10) se pueden obtener las siguientes conclusiones (Muller et al., 2005):

1. Si el número de zonas es pequeño $A_l \cong A_m$

Número de zonas impar la amplitud en el punto P será A_l .

Número de zonas par la amplitud en el punto P será cero.

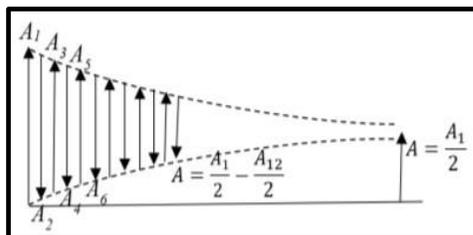
2. Si el número de zonas es grande $A_m = 0$

Tanto para un número de zonas par o impar la amplitud en el punto P será $\frac{A_1}{2}$.

Una vez que en 1818 Fresnel expuso su teoría de la difracción a la Academia Francesa de Ciencias, Poisson (1781-1840) calculó, examinando los trabajos de Fresnel, que en el centro de la sombra proyectada por una esfera iluminada debía aparecer un punto luminoso, el punto fue observado experimentalmente por Arago (1786-1853). Analizando las ecuaciones (9) y (10) se obtiene el resultado que Poisson predijo, se observa que con un gran número de zonas abiertas par o impar (onda sin obstrucción), la onda esférica contribuirá en el punto P en una amplitud de $A_l/2$ (Fig.11), si se interpone una esfera que tape la primera zona equivalente a eliminar el vector A_l esta no contribuirá a la amplitud en P , pero el número de zonas abiertas es grande de modo que la amplitud en P sigue siendo $A_l/2$ (Muller et al., 2005).

³ En el anexo 3 se muestra el resultado para un número de zonas par.

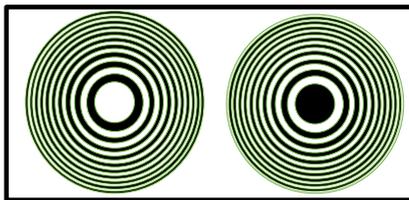
Figura 11. Vectores de amplitud de las zonas de Fresnel



Nota. La intensidad en P de una onda sin obstruir es igual a la mitad de la intensidad de la primera zona.

Una de las trabas de la teoría ondulatoria era la de explicar la propagación rectilínea de la luz. Con las zonas de Fresnel el problema se resuelve, la intensidad luminosa en un punto generada por una onda esférica propagándose sin obstrucción es $A_1/2$ (Fig.11), si se obstruye la onda con una pantalla opaca con un agujero y este contiene un número pequeño de zonas impar, entonces la intensidad luminosa en un punto frontal al agujero será A_1 véase (Ec.9), es como si la luz viajara por un estrecho túnel desde la fuente luminosa pasando por el agujero hasta un punto en frente, propagación rectilínea (Muller et al, 2005).

Este antecedente es significativo para la investigación obtenido de la Revista brasileña de enseñanza de física (2005) trabajo titulado: *Un experimento simple utilizado en la producción de placas de zona de Fresnel*. Las placas son circulares y tienen anillos concéntricos intercalados opacos y transparentes. Cuando un frente de onda incide en la placa, los anillos opacos no serán emisores, mientras que los anillos transparentes se generan fuentes de ondas secundarias de Huygens, las cuales interfieren al otro lado.

Figura 12. *Placas zonales*

Pero, Huygens no tuvo en cuenta las ondas en retroceso, Kirchhoff demostró después que la intensidad de las ondas secundarias depende del ángulo, es nula para $\theta \geq \pi/2$ y máxima en la dirección del frente de onda principal cuando $\theta=0$, factor de oblicuidad $K(\theta)$ (Muller et al., 2005).

3. LA IMPORTANCIA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL Y LA DIFRACCIÓN EN EL ÁMBITO EDUCATIVO

3.1 Influencia de las Clases y de los Libros en la Construcción de los Conceptos

Es de destacar que el fenómeno de la difracción representó un hecho desde el cual se empezó a desarrollar nuevas teorías sobre la naturaleza de la luz, como la ondulatoria en contra de la corpuscular que procuraba explicar el hecho sin prescindir de la propagación rectilínea de los corpúsculos y por tanto de la luz. Tuvieron que pasar 200 años desde el s. XVII al XIX para que se reconociera que la luz tiene naturaleza ondulatoria, este hecho histórico resulta análogo en la educación y enseñanza de la óptica cuando los alumnos también presentan conflictos para entender y reproducir los fenómenos ondulatorios de la luz, dando sus razonamientos en términos de la óptica geométrica o mezclando ambas teorías, lo que indica una dificultad en el curso de modificar un paradigma (Bravo & Pesa, 2015).

Las primitivas formas de interpretar la propagación de la luz en la historia de la óptica como rayos emitidos por los ojos, óptica geométrica, Ley de Snell, son semejantes a las ideas preconcebidas por los estudiantes para pronosticar el fenómeno. Ellos organizan la información

que adquieren de las actividades didácticas y del libro de texto para elaborar sus esquemas sobre la óptica, pues en la mayoría de las veces el texto es el sustento para elaborar el currículo, así, el profesor es el agente que determina la evolución del aprendizaje. Entonces, ciertos conflictos que presentan los estudiantes se pueden entender desde la epistemología genética, es decir, cual es el origen y el sendero seguido para construir los conceptos establecidos (Bravo & Pesa, 2015).

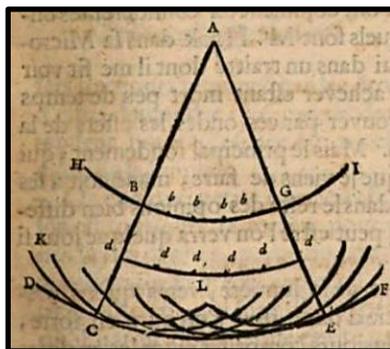
Los libros de texto modifican las ideas originales propuestas por Huygens, algunas de sus ideas son, que la luz se propaga como ondas en una perturbación de las partículas de éter por choques elásticos y longitudinales, además, todos los puntos del objeto vibran irregularmente y emiten luz. Con la construcción geométrica Huygens explicó satisfactoriamente, la reflexión, la refracción y la propagación rectilínea, sin embargo, los libros didácticos exponen la representación de Huygens como ondas periódicas y en algunos no aparece la fuente, destacar que los libros transmiten las ideas de Huygens con otra terminología, como onda principal y secundarias, y con nociones que se desenrollaron después, como, velocidad, envolvente, frecuencia etc. (Hecht, 2000).

En los laboratorios es necesario indicar propiedades de la fuente, tamaño y modo de emisión, además, en ocasiones en los libros de texto se publican fotografías incompletas, que muestran un detalle del patrón de difracción únicamente en una parte del obstáculo, faltando la adecuada contextualización del sistema físico real con el cual se ejecuta el experimento que conduce al resultado.

Otros aspectos relevantes que no se explicitan adecuadamente en los textos contemporáneos de instrucción universitaria son los detalles referentes a los trabajos experimentales de Young los cuales son sumamente interesantes.

La siguiente ilustración (*Fig.13*) muestra un esquema muy conveniente actualmente como método para operar la teoría de la difracción, además de describir la propagación rectilínea de la luz la cual era una certeza experimental lejos de toda duda en aquella época.

Figura 13. *Esquema realizado por Huygens*



Nota. Demostrar la propagación rectilínea de la luz. Reproducido de *Traite de la Lumière*, Pierre Vander, 1690, <https://play.google.com/books/reader?id=No8PAAAAQAAJ&pg=GBS.PP6>.

Asimismo, Huygens no pudo obtener una definición de los colores al no percibir la periodicidad de las ondas de luz, de igual modo decía que las porciones de las ondas secundarias que se propagan externamente a la zona BAG son muy débiles para provocar luz, y solo se produce luz en los puntos donde las ondas secundarias tocan la envolvente. Estos razonamientos le impidieron percatarse que, siendo de naturaleza ondulatoria, la luz debería actuar como el sonido dando vuelta a los obstáculos y dispersándose en las aberturas.

Uno de los problemas más difíciles en el cambio de paradigma era hallar hipótesis que también explicaran la propagación rectilínea de la luz. Cuando los estudiantes se enfrentan a contextos experimentales que involucren fenómenos de interferencia y difracción razonan y dan sus predicciones, interpretaciones y explicaciones considerando que la luz se propaga en líneas rectas. Esto es resultado de las observaciones y experiencias cotidianas durante su vida tal como la formación de sombras y penumbras. Se atribuye también a la educación formal y a los libros de texto en esta construcción gradual de conceptos, el punto de partida desde donde se establecieron

los conocimientos previos de los estudiantes es una señal de ayuda para comprender los conflictos propios al cambio de paradigma.

Esas dificultades que presentan los estudiantes se pueden atenuar con el trabajo experimental en distintos niveles de enseñanza, se puede adaptar a los estudiantes con las teorías y los fenómenos físicos en cualquier nivel de enseñanza empleando métodos experimentales. La interpretación del fenómeno de la difracción es compleja y requiere de herramientas matemáticas avanzadas, es buen ejemplo para mostrar que, adaptándose al nivel de conocimientos matemáticos y físicos de los estudiantes, se puede interpretar el fenómeno, realizar experimentos y comprobar teorías. El grado de profundización dependerá del nivel, por ejemplo:

Tabla 1.

Enseñanza de la difracción en diferentes niveles.

<i>Nivel</i>	<i>Exhibición</i>	<i>Intención</i>
<i>Introducción de la difracción en bachillerato</i>	<p>Cualitativa: fenómenos naturales donde se ve la difracción, rayos de Sol al filtrarse por hojas de árboles, luz vista atravesando una red o rendijas angostas, luz a través de corpúsculos en suspensión.</p> <p>Cuasi cuantitativa: dependencia de la banda central A con respecto al ancho de la rendija D, la relación es una recta, A y D tienen proporcionalidad inversa (C. Carreras, 2007).</p>	<p>Que los estudiantes noten la relevancia de los métodos difraccionales en el examen del tamaño de cuerpos pequeños como glóbulos, cabellos, bacterias, etc. con la pendiente de la recta.</p>
<i>Introducción de la difracción primeros ciclos de universidad</i>	<p>Cuantitativa: los estudiantes saben la representación matemática básica de la difracción, experimentos cuantitativos con tecnologías computacionales, investigar la intensidad difractada por una rendija y su articulación teórica para Fraunhofer. Se requiere láser, rendija de ancho graduable, posicionadores micrométricos, fotómetro, multímetro. Se mide la distribución de intensidad de la franja central (C. Carreras, 2007).</p>	<p>Que los estudiantes hagan uso de tecnologías tanto computacionales como de instrumentos de laboratorio. Se confrontan los resultados que brinda la teoría con los resultados experimentales obtenidos.</p>

<i>Introducción de la difracción en posgrados</i>	<p>Cuantitativa: los estudiantes conocen el principio de Huygens-Fresnel, de donde vienen las teorías de Fresnel y Fraunhofer, probar experimentalmente la ratificación de las dos teorías.</p> <p>Difracción por cuerpos milimétricos que sean establecidas por técnicas directas (pie de rey, etc.). Instrumentos de laboratorio modernos y precisos. Difracción por un filo recto, los patrones se capturan sobre una cámara. Difracción de Fresnel de una rendija de 1 mm de ancho. Valores experimentales de intensidad y las correspondientes curvas teóricas (C. Carreras, 2007).</p>	<p>Que los estudiantes verifiquen experimentalmente las teorías existentes. Se realiza el estudio teórico y su comparación con la figura capturada.</p>
---	--	---

“Los experimentos, por sencillos que sean, permiten a los alumnos profundizar en el conocimiento de un fenómeno, estudiarlo teórica y experimentalmente, desarrollar habilidades y actitudes propias de los investigadores” (C. Carreras, 2007).

3.2 Papel de la Actividad Experimental en la Educación Científica

El trabajo experimental es uno de los componentes esenciales en el desarrollo de la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, sin embargo, todavía en el presente se evidencian dificultades respecto con esta clase de actividades que encaminan a las siguientes preguntas,

¿Qué imágenes distorsionadas de la actividad científica es posible que estén comunicando los prácticas experimentales que se ejecutan? ¿Qué idea del vínculo ciencia-tecnología frecuentan comunicar? ¿Cuál convendría ser la función del trabajo experimental en la formación en ciencias? ¿Cómo se tendría que redirigir las prácticas de laboratorio para que dejen de consistir en vanos procedimientos a emplear? (Jaime Carrascosa, 2005).

Se debe tener en cuenta las potencialidades de la experimentación afirmando que desarrolla la curiosidad, suscita discusiones, demanda reflexión, elaboración de hipótesis y espíritu crítico,

enseña a analizar los resultados y expresarlos correctamente, favorece una mejor percepción de la relación entre ciencia y tecnología, etc.

Las actividades de laboratorio, tanto el diseño como la experimentación, se planteen como investigaciones en torno a problemas de interés haciendo una crítica a las orientaciones algorítmicas y empiristas que se limitan a describir la construcción y manejo de distintos instrumentos y montajes experimentales, ello no les quita interés a los trabajos presentados, pero se plantea las actividades de laboratorio como investigación (Jaime Carrascosa, 2005).

a. . *Análisis crítico de las prácticas de laboratorio habituales*

Desde hace algunas décadas se investiga en el trabajo experimental la evolución de una instrucción estrictamente de libros y el recurso a la carencia de interés por el aprendizaje de las ciencias. Este trabajo se considera obstaculizado por elementos externos (carencia de instalaciones y equipo apropiado, gran número de estudiantes, condición enciclopédico de los currículos...).

Los trabajos de laboratorio como simples manipulaciones pueden transmitir visiones deformadas sobre la ciencia, el carácter de simple receta, su énfasis en la realización de mediciones y cálculos, y se plantea la ausencia de aspectos fundamentales para la construcción de conocimientos científicos tales como la discusión de la relevancia del trabajo a realizar y el esclarecimiento de la problemática en que se inserta, la participación de los estudiantes en el planteamiento de hipótesis y el diseño de los experimentos, el análisis de los resultados obtenidos, etc. no se indican las cuestiones a las que se pretende dar respuesta lo que contribuye a una visión a-problemática de la ciencia, ni se discute su posible interés y relevancia social (visión descontextualizada, socialmente neutra), ni se procede a la formulación tentativa de hipótesis susceptibles de ser sometidas a prueba mediante diseños concebidos al efecto, se pide a los estudiantes que sigan una guía detallada, lo que contribuye a una visión rígida, algorítmica y

cerrada de la ciencia, faltando incluso el análisis crítico de los resultados obtenidos, el planteamiento de nuevos problemas. Fundamental que los estudiantes tengan ocasión de participar en la elaboración de diseños experimentales dado el papel central que juega dicho diseño en la investigación y, muy en particular, para que adquieran una correcta visión de las relaciones ciencia-tecnología, su realización exige resolver problemas prácticos en un proceso complejo (Jaime Carrascosa, 2005).

b. . Los trabajos experimentales a modo de investigación

En seguida, se exhiben diez temas a recordar para orientar los trabajos experimentales a modo de investigación

i Exponer escenarios problemáticos abiertos de un grado de complejidad apropiado, prepararse en la modificación de escenarios problemáticos abiertos en problemas puntuales (Jaime Carrascosa, 2005).

ii Propiciar el razonamiento de los estudiantes sobre la importancia y el posible atractivo de los escenarios planteados, que provea significado a su estudio incorporando las eventuales intervenciones entre ciencia, tecnología, sociedad y ambiente (CTSA) (Jaime Carrascosa, 2005).

iii Reforzar los estudios cualitativos, significativos, que favorezcan la comprensión, delimiten los escenarios propuestos y ayuden a concretar cuestiones operativas sobre lo que se investiga (Jaime Carrascosa, 2005).

iv Proponer la formulación de hipótesis como acción esencial de la investigación científica, de hacer manifiestas, funcionalmente, las ideas preconcebidas de los estudiantes. Estar atento a la modificación de los conocimientos. Pedir una minuciosa operativización de las

hipótesis, esto es, la obtención de consecuencias comprobables, procurando el necesario cuidado al control de variables (Jaime Carrascosa, 2005).

v Otorgar toda su relevancia a la creación de diseños y a la organización del trabajo experimental por los mismos estudiantes, facilitar una perspectiva de trabajo científico-técnico contemporáneo. Estar atento a los probables riesgos (para los alumnos o para el medio ambiente) y contemplar formas de suprimirlos o atenuarlos (Jaime Carrascosa, 2005).

vi Proponer el estudio paciente de los resultados (su interpretación física, fiabilidad, etc.), teniendo en cuenta el corpus de conocimientos asequibles, las hipótesis operadas y de los resultados de otros investigadores. Conceder, teniendo en cuenta los resultados, chequeo de los diseños, de las hipótesis, o, inclusive, del planteamiento del problema. Estar atento a los choques cognitivos entre los resultados y las ideas iniciales, favoreciendo así, de una forma funcional, las modificaciones conceptuales y el acercamiento a las discusiones históricas (Jaime Carrascosa, 2005).

vii Sugerir la contemplación de factibles enfoques (replanteamiento del estudio a otro nivel de complejidad, problemas obtenidos...) y pensar, en específico, las implicaciones CTSA (Jaime Carrascosa, 2005).

viii Solicitar un esfuerzo de incorporación que contemple la aportación del estudio ejecutado a la edificación de un corpus razonable de conocimientos, asimismo los posibles alcances en distintos ámbitos del conocimiento (Jaime Carrascosa, 2005).

ix Relevancia a la redacción de memorias científicas que muestren el trabajo ejecutado y puedan valer de fundamento para destacar la función de la comunicación y la discusión en la actividad científica (Jaime Carrascosa, 2005).

x Fortalecer la dimensión en conjunto del trabajo científico constituyendo grupos de trabajo y favoreciendo la interacción entre cada grupo y la colectividad científica, caracterizada en la clase por los otros equipos, el corpus de conocimientos ya establecido (reunido en los manuales escolares y en textos de historia de la ciencia), el profesor como especialista, etc. el corpus de conocimientos establece la concreción y el acuerdo del trabajo elaborado (Jaime Carrascosa, 2005).

4. ELABORACIÓN DE LA GUÍA

Hay que señalar que después del proceso investigativo de este trabajo de grado, se propone realizar una *Guía de experimentos básicos sobre difracción de la luz*, (Ver Anexo 1), esta guía se desarrolla con el uso de materiales de bajo costo y fácil adquisición, y se fundamenta sobre un enfoque fenomenológico que determina la actividad experimental a realizar. Vale la pena aclarar que la guía no se implementó en el aula de clase, se deja más bien como una propuesta, que puede ser utilizada por el docente para la enseñanza de algunos conceptos básicos sobre la difracción de la luz, y sobre todo, que se conciba la actividad experimental llevada a cabo en el aula como un trabajo investigativo, donde se hagan explícitas hipótesis, se efectúe la creación de diseños y organización del trabajo, que sea significativo y tenga implicaciones con la CTSA, que se logre la función de discusión y comunicación, así como los posibles alcances en los distintos ámbitos del conocimiento.

Es conveniente llevar a cabo la guía porque se trabaja con materiales fáciles de conseguir y de bajo costo, lo cual facilita su realización en cualquier institución educativa; son experimentos sencillos de realizar, los pueden llevar a cabo estudiantes de básica secundaria o universidad; se trabaja un tema que pasa desapercibido por los maestros y no se encuentra entre los tópicos a

trabajar dentro del currículo, por lo que la guía se concibe como una herramienta que contribuye a abordar el tema en el aula; las pocas veces que se discute sólo se muestra el patrón producido por una rejilla de difracción habiendo una buena cantidad de diferentes experimentos posibles de realizar como algunos que se proponen en la guía; el fenómeno de la difracción es poco comprendido por los estudiantes, por tal motivo es importante pensar estrategias experimentales que favorezcan una aproximación al fenómeno; se trabajan temas que son escasamente tratados en el aula como la mancha de Poisson, el disco de Airy y el experimento de Young de la doble rendija, y otros que nunca han sido abordados en el aula como la difracción por zonas de Fresnel o la difracción por objetos complementarios referente al principio de Babinet.

En las prácticas pedagógicas llevadas a cabo en el colegio Manuela Beltrán se pudo evidenciar que la institución contaba con un pequeño laboratorio de física de 2 o 3 metros cuadrados, donde reposaban instrumentos sobre todo para tratar temáticas referentes a la electricidad y magnetismo; se observó la carencia de material experimental alusivo a la enseñanza de las leyes de Newton y de óptica geométrica, y material inexistente para la enseñanza básica de la interferencia y difracción de la luz. Además, se evidenció que, si bien el departamento de física de la UPN cuenta con algunos instrumentos de laboratorio sobre todo para la enseñanza de la óptica geométrica, los instrumentos son escasos para abordar la enseñanza de la óptica física o, si los hay, raramente son utilizados por los maestros de la institución. Ahora bien, durante el transcurso de la carrera universitaria nunca se observó laboratorios dedicados a la visualización del punto de Poisson o el disco de Airy, y mucho menos instrumentos o materiales para dar cuenta de la difracción por zonas de Fresnel o dar cuenta del principio de Babinet.

5. REFLEXIONES FINALES

Llevar a cabo un trabajo experimental minucioso desde un enfoque fenomenológico permite al estudiante construir el fenómeno y aprender de él, realizar los experimentos implica dedicación, además de contar con un método científico experimental para aplicar, como el método de ensayo y error, este método funciona para adquirir conocimiento y en la solución de problemas, implica también tener guías y referentes documentales de trabajos existentes en el tema, ya que estos trabajos cuentan con cierto nivel de desarrollo lo cual es útil para ejecutar un trabajo más práctico.

Así mismo, la experiencia sensible que las personas han organizado en su contacto con la naturaleza juega un rol importante, si se carece de ésta experiencia en lo que respecta al fenómeno luminoso, se puede partir de un punto diferencial donde se exterioricen los modos de hablar de óptica geométrica y ondulatoria, esto establece el campo fenomenológico, teniendo en cuenta las organizaciones que ya se han erigido. Mediante las diferentes acciones, es importante empezar por organizar un grupo de atributos a partir de donde se logre determinar lo ondulatorio, así como la relación entre variables, donde la actividad experimental juega un papel sustancial en la construcción y manifestación de la experiencia sensible, para la construcción de la fenomenología (Malagón, 2012).

Así como el dominio de la experiencia se transforma, también el dominio del lenguaje que se establece para hablar del fenómeno, éste proceso es la formalización de: asociaciones algebraicas o lenguajes matemáticos, construcción de palabras, símbolos, bosquejos, técnicas, proposiciones y demás, que permiten referirse al fenómeno. Por otro lado, estudiar el proceso de construcción de una magnitud y sus modos de medida, admite a la vez, explorar diferentes caminos en la configuración y ampliación de la fenomenología, y concebir pautas para el planteamiento de los problemas conceptuales (Malagón, 2012).

Además, durante la realización de la actividad experimental con la guía se confirma un hecho científico relevante, que indica que la labor teórica y conceptual está determinada por la labor experimental y, en doble sentido, la labor experimental está determinada por la teoría, justamente, es casi inimaginable concebir un experimento sin contar con un sustento teórico y conceptual, y no hay estructuras conceptuales que no estén vinculadas a una determinada experiencia sensorial.

Referencias

- Bravo, S., & Pesa, M. (08 de 10 de 2015). El fenómeno de la difracción en la historia de la óptica y en los libros de texto reflexiones sobre sus dificultades de aprendizaje. *Investigações em Ensino de Ciências*, 76-77. Obtenido de www.if.ufrgs.br:
<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/viewFile/44/24>
- C. Carreras, M. Y. (01 de 09 de 2007). *La importancia del trabajo experimental en física: un ejemplo para distintos niveles de enseñanza*. Obtenido de biblat.unam.mx:
<https://biblat.unam.mx/hevila/Revistacubanadefisica/2007/vol24/no1/20.pdf>
- Castañeda Sepúlveda, R. (2012). A veces Incluso Ondula. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 52. Recuperado el 05 de Marzo de 2022, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/download/49003/50073/239233>
- De Senarmont, H. (1866). Obras Completas de Augustin Fresnel. En H. De Senarmont, *Obras Completas de Augustin Fresnel* (págs. 1-383). París: Impresión Imperial. Obtenido de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1512245j/f11.item>
- El Tunel del Misterio. (04 de Julio de 2021). Punto de Poisson[Video]. YouTube. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=ON5sQUmDZaU>

Eliexer, P. L., & Nelson, F. (Marzo de 2009). *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. Obtenido de

https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/9911/Perez_Falcon_2009.pdf?sequence=1

Físicainvideo. (14 de Junio de 2019). Punto di Poisson [Video]. YouTube. Obtenido de

<https://www.youtube.com/watch?v=EDkwfqgty2M>

Fraga, F. (2016). Los oscuros orígenes de la cámara oscura: Alhacén y sus predecesores. *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 88. doi:10.4995/ega.2016.6050

Gouy. (1886). *gallica.bnf.fr*. Obtenido de Anales de química y física:

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65685787/f164.item.r=difraction.texteImage>

Gribbin, J. (2001). Historia de la Ciencia 1543-2001. En J. Gribbin, *Historia de la Ciencia 1543-*

2001 (págs. 143-146). Barcelona: Crítica. Obtenido de [http://www.ula.ve/ciencias-](http://www.ula.ve/ciencias-juridicas-politicas/images/NuevaWeb/Material_Didactico/ProfeYubeira/Historia-de-la-ciencia-1543---2001---John-Gribbin.pdf)

[juridicas-politicas/images/NuevaWeb/Material_Didactico/ProfeYubeira/Historia-de-la-](http://www.ula.ve/ciencias-juridicas-politicas/images/NuevaWeb/Material_Didactico/ProfeYubeira/Historia-de-la-ciencia-1543---2001---John-Gribbin.pdf)

[ciencia-1543---2001---John-Gribbin.pdf](http://www.ula.ve/ciencias-juridicas-politicas/images/NuevaWeb/Material_Didactico/ProfeYubeira/Historia-de-la-ciencia-1543---2001---John-Gribbin.pdf)

Guerrero, R. F. (11 de Febrero de 2016). <https://scielo.isciii.es/>. Obtenido de

<https://scielo.isciii.es/>:

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6f725ab9f64907c2JmltdHM9MTY1ODUzMzAzMy>

[ZpZ3VpZD00YjNlNGVkbkZS03MTBmLlRlNjQyYy00M2Q4NDJmMjIzOWEmaW](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6f725ab9f64907c2JmltdHM9MTY1ODUzMzAzMy)

[5zaWQ9NTEyNw&ptn=3&hsh=3&fclid=3649835f-0a17-11ed-811a-](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6f725ab9f64907c2JmltdHM9MTY1ODUzMzAzMy)

[6a9d6f2a2948&u=a1aHR0cHM6Ly9zY2llbG8uaXNjaWlpLmVzL3NjaWVsby5waHA_c](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6f725ab9f64907c2JmltdHM9MTY1ODUzMzAzMy)

[2NyaX](https://www.bing.com/ck/a?!&&p=6f725ab9f64907c2JmltdHM9MTY1ODUzMzAzMy)

Jaime Carrascosa, D. G. (01 de 09 de 2005). *Papel de la actividad experimental en la educación científica*. Obtenido de dialnet.unirioja.es:

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5166022.pdf>

- Jenkins, F. (1964). Fundamentos de optica. En F. Jenkins, *Fundamentos de optica*. Madrid: Aguilar.
- Malagón, S. s. (17 de Diciembre de 2012). *La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización*. Obtenido de www.scielo.org.co:
<http://www.scielo.org.co/pdf/pafi/n36/n36a06.pdf>
- Muller, M. (07 de 07 de 2005). *Un experimento simple utilizado en la producción de placas de zonas de Fresnel*. Obtenido de www.semanticscholar.org:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Um-experimento-simples-usado-na-produ%C3%A7%C3%A3o-de-placas-Muller-Silva/238c2c8d44fbd31ce640e073824b5e2575fa090b>
- PIE UCM. (2013). Difracción a través de una Rendija/Diffraction with a Laser [Video]. YouTube. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=-gA_hHWluAQ
- Pina, C. M. (2017). *Cristales y difracción en video clips*. Obtenido de eprints.ucm.es:
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/48199/1/Memoria%20Proyecto%20Innovacion%2085.pdf>
- Silvester, S. (s.f.). www.frro.utn.edu.ar/. Obtenido de www.frro.utn.edu.ar/:
[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/\(6\)%20DIFRACCI%C3%93N.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/(6)%20DIFRACCI%C3%93N.pdf)
- Tipler, P., & Mosca, G. (2010). *Física para la Ciencia y la Tecnología*. New York: Reverté.
- Torres, C. M. (2012). *Propuesta didáctica basada en la Metodología de Aprendizaje Activo encaminada a construir el concepto de difracción partiendo de prácticas experimentales*. Obtenido de repositorio.unal.edu.co:

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11116/carolinamanriquetorres.2012.pdf?sequence=1>

Veritasium en Español. (30 de Enero de 2021). ¿Cuá es el punto más brillante de una sombra? -

Curiosidades Científicas[Video]. YouTube. Obtenido de

<https://www.youtube.com/watch?v=gxvtsk0rruk&t=3s>

Introducción

Esta guía fue realizada para su uso en el aula por docentes de bachillerato en los grados décimo y undécimo, esta es útil como un complemento para la realización de actividades experimentales con los estudiantes en torno a construir los conceptos básicos de la difracción. Contiene las instrucciones para construir los elementos necesarios para realizar los montajes con materiales de bajo costo y fáciles de conseguir, y la forma como debe llevarse a cabo cada experimento.

Objetivo

El objetivo es establecer algunos conceptos básicos sobre la difracción desde el principio de Huygens-Fresnel, basados en la metodología de aprendizaje activo con la intención de motivar a los estudiantes a participar activamente en la construcción de los instrumentos y realización de las actividades experimentales.

4.3 Construcción de los instrumentos

Con materiales de bajo costo y fáciles de conseguir se procede a la construcción de los instrumentos los cuales serán utilizados en las actividades experimentales propuestas sobre la difracción de la luz. Algunos instrumentos como las lentes y laser, que no se construyen en esta guía, el docente los debe llevar al aula para la realización de la práctica.

4.3.1 Base para Láser

Materiales (Foto.1)

1. Un Bloque o bola de poliestireno
2. Un Destornillador
3. Un Bisturí
4. Un Esfero
5. Una Regla
6. Un Encendedor

¹ Todas las fotografías presentadas fueron tomadas por el autor.

7. Dos tornillos de 1 pulgada
8. Un tornillo de 11/4 pulgada
9. Una Abrazadera de plástico doble oreja para tubo de 3/4 de pulgada
10. Un Alicata

Foto 1¹. Materiales Base para Láser



Procedimiento

Con el bisturí corte la bola de poliestireno por la mitad, coja una mitad y por la parte esférica trace un canal, con la ayuda del esfero, la regla y el bisturí, de 1cm por 2cm de profundo como se muestra en la (Foto.2). Luego agarre el tornillo de 11/4" con el alicate y con el encendedor caliente la punta del tornillo y abra un pequeño hueco en el centro de la abrazadera de plástico y, con el destornillador haga rosca con el tornillo, este tornillo sirve para presionar el botón del láser y mantenerlo encendido. Coja los dos tornillos de 1" y atornille la abrazadera al poliestireno por la parte de las orejas como muestra la (Foto.2).

Foto 2. Base para Láser



Con la otra mitad de la bola haga un soporte para marco (Foto.3), abriendo con el bisturí una ranura donde irá puesto el marco. Corte con el bisturí unas bases en láminas de

poliestireno de 1cm de grosor para nivelar la altura de los elementos cuando se necesite.

Foto 3. Soporte para Marco y Bases para Nivelar



4.3.2. Marco para Diapositiva

Materiales (Foto.4)

1. 1/8 de cartón paja
2. Un bisturí
3. Una regla
4. Un esfero

Foto 4. Materiales Marco Diapositiva



Procedimiento

Con la regla y el esfero dibuje el contorno de 10 cuadrados de 4 cm de lado sobre el cartón paja, luego corte los cuadrados con el bisturí. En el interior de este cuadrado dibuje otro cuadrado de 3.5 cm de lado de modo que quede un marco de $\frac{1}{2}$ cm, corte con un bisturí el cuadrado interno. El marco obtenido será útil para poner las diapositivas y el cuadrado interno se corta como en la (Foto.5), para tapar las zonas de la diapositiva y dejar abierto sólo el elemento con el que se va a experimentar.

Foto 5. Marco para Diapositiva



4.3.3. Rendija Alargada en Papel Aluminio

Materiales (Foto.6)

1. Un pegante para madera
2. Un micropunta
3. Un bisturí
4. Un cuadro de papel aluminio
5. Una regla
6. Unas tijeras
7. Un Alicate

Foto 6. Materiales Rendija Alargada



Procedimiento

Con la ayuda de la regla, el micropunta y las tijeras corte un cuadrado de papel aluminio de 4 cm de lado. Para hacer la rendija no se recomienda deslizar la cuchilla del bisturí sobre el papel aluminio ya que éste se rasga, más bien ponga el papel aluminio sobre una superficie rígida y el filo de la cuchilla perpendicular a la superficie del papel aluminio con un alicate dé un golpe por encima de la cuchilla de modo que quede una rendija abierta del ancho del filo de la cuchilla (Foto.7). Ponga el cuadro de papel aluminio en el marco para diapositiva con pegante.

Foto 7. Rendija Alargada



4.3.4. Rendija Alargada Formada con Cinta

Materiales (Foto.8)

1. Un pegante para madera
2. Un micropunta
3. Un bisturí
4. Una Cinta aislante de color
5. Una regla
6. Un cuadrado de acetato

Foto 8. Materiales Rendija Alargada con Cinta



Procedimiento

Con la ayuda de la regla, el micropunta y el bisturí corte un cuadrado de acetato de 4 cm de lado. Luego corte tres pedazos de cinta de 4 cm, y pegando la cinta sobre el acetato haga dos rendijas una de 0.5 mm de ancho y la otra de 1 mm (Foto 9). Luego pegue las rendijas sobre el marco para diapositivas con pegante.

Foto 9. Rendija Alargada Formada con Cinta



4.3.5. Abertura Circular en Papel Aluminio

Materiales (Foto.10)

1. Un bisturí
2. Un Esfero
3. Un pegante para madera
4. Una regla

5. Una aguja de 1.5 mm de diámetro
6. Una aguja de 1 mm de diámetro
7. Un cuadro de papel aluminio

Foto 10. Materiales Abertura Circular



Procedimiento

Con la ayuda de la regla, el micropunta y las tijeras corte un cuadrado de papel aluminio de 4 cm de lado, luego con pegante pegue el cuadro de papel aluminio al marco para diapositiva cuidando que quede templado. Cuando esté seco coja la aguja de 1 mm y con la sola puntita abra una pequeña abertura sobre el aluminio (Foto.11), luego abra otras aberturas más grandes introduciendo la aguja un poco más en el aluminio.

Foto 11. Abertura Circular



4.3.6. Doble Rendija en Papel Aluminio

Materiales (Foto.12)

1. Un pegante para madera
2. Un micropunta
3. Un bisturí
4. Un cuadro de papel aluminio
5. Una Cinta
6. Una regla
7. Un cuadrado de acetato

Foto 12. Materiales Doble Rendija



Procedimiento

Ponga el papel aluminio sobre una superficie rígida, luego ponga el filo de la cuchilla del bisturi perpendicular a la superficie del papel aluminio y dé un golpe por encima de la cuchilla con un alicate de modo que quede una rendija abierta del ancho del filo de la cuchilla. Haga otra rendija paralela a la otra lo más cerca que pueda de la anterior, ensaye varias veces hasta que obtenga dos rendijas muy juntas, paralelas y con bordes suaves, luego corte el pedazo que incluye las rendijas en un cuadro de 4 cm de lado. Corte un cuadro de acetato de 4 cm de lado y péguelo al marco para diapositiva, luego ponga el cuadro con las rendijas sobre el acetato y péguelo con cinta de modo que queden destapadas las rendijas (Foto.13).

Foto 13. Doble Rendija en Papel Aluminio



Nota. Observe que las rendijas tienen forma de "V" donde la separación de las rendijas es mayor en la parte superior y va disminuyendo hacia la parte inferior, lo que resulta ideal para experimentar con la variable separación d entre las rendijas.

4.3.7. Aberturas y Obstáculos Poligonales (Principio de Babinet)

Materiales (Foto.14)

1. Un pegante para madera
2. Un micropunta
3. Un bisturi
4. Una Cinta
5. Una regla
6. Un cuadrado de acetato

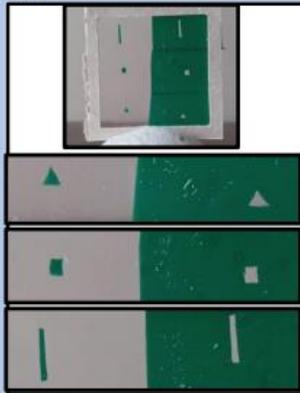
Foto 14. Materiales Aberturas y Obstáculos Poligonales



Procedimiento

Corte tres pedazos de cinta de 2 cm de largo, ponga los pedazos sobre una base de vidrio de modo que pueda cortarlos, con la ayuda de la punta del bisturi corte minuciosamente sobre cada pedazo de cinta un diminuto triángulo, un cuadrado y una rendija, extraiga los pedazos cortados. Luego pegue los pedazos cortados sobre un costado de un cuadro de acetato de 4 cm de lado (Foto.15), y pegue las cintas con las aberturas al otro costado, luego pegue el acetato al marco para diapositiva.

Foto 15. Aberturas y Obstáculos Poligonales



4.3.8. Aberturas Poligonales Formadas con Cinta

Materiales (Foto.16)

1. Un pegante para madera
2. Un micropunta
3. Un bisturi
5. Una Cinta
6. Una regla
7. Un cuadrado de acetato

Foto 16. Materiales Aberturas Poligonales Formadas con Cinta



Procedimiento

Corte con ayuda de la regla, el micropunta y el bisturi un cuadro de acetato de 4 cm de lado, luego corte tres pedazos de cinta y péguelos uno por uno en el acetato de modo que forme una abertura triangular (Foto.17). Corte cuatro pedazos de cinta y forme un cuadrado sobre el mismo pedazo de

acetato, luego pegue sobre un marco para diapositiva.

Foto 17. Aberturas Poligonales



4.3.9. Iris o abertura circular variable

Materiales (Foto.18)

1. Un compás
2. Un micropunta
3. Dos cuadros de cartón paja
4. Un bisturi
5. Un pegante para madera
6. Una regla

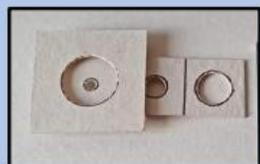
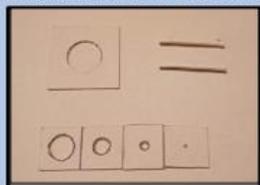
Foto 18. Materiales Iris o Abertura Circular Variable



Procedimiento

Con la regla, el micropuntas y el bisturí corte un rectángulo de cartón paja de 10 cm por 2.5 cm, luego con el micropunta divida el rectángulo en cuatro cuadros de 2.5cm x 2.5cm y en cada cuadro dibuje un círculo de diámetro 2cm, 1.5cm, 1cm y 0.5cm, corte los círculos con el bisturí (Foto.19). Luego corte un cuadro de cartón paja de 4cm x 4cm y en el interior de este corte un círculo de 3cm de diámetro y haga dos cuñas con cartón paja para sostener y mover las aberturas variables, luego pegue a un marco para diapositiva. Estas aberturas circulares son útiles para linealizar la luz cuando sea necesario o para crear una fuente puntual.

Foto 19. *Iris o Abertura Circular Variable*



4.5. Experimentación y Observación del Fenómeno

4.5.1. Difracción por una Abertura Circular (Observación del Disco de Airy)

Objetivo

Comprender el cambio en la intensidad luminosa del disco de Airy desde la teoría de las zonas de Fresnel, el disco se forma por la difracción por una abertura circular.

Materiales (Foto.20)

1. Una diapositiva con aberturas circulares
2. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
3. Dos lentes bicóncavas
4. Una cinta
5. Un soporte para láser
6. Un soporte para diapositiva

Foto 20. Materiales Difracción por Abertura Circular



Procedimiento

Haga el montaje que se muestra en la (Foto.21) ubicando la primera lente cerca del láser de tal manera que los rayos diverjan desde el foco de la lente como si se tratara de una fuente puntual, estos rayos inciden en la abertura generando un patrón de difracción particular. La segunda lente se ubica al costado derecho del agujero con el propósito de que el patrón de difracción diverja y se vea más grande en la pantalla, este experimento fue consultado en (PIE UCM, 2013). Ahora realice los siguientes dos procedimientos,

- Varíe el diámetro de la abertura, manteniendo igual la configuración de todos los demás instrumentos, y

observe que ocurre en el centro del patrón o disco de Airy.

- Acerque la pantalla de observación hacia la abertura poco a poco, manteniendo la misma abertura, y observe nuevamente que ocurre con el disco de Airy.

Foto 21. Montaje y Patrón Observado Difracción por Abertura Circular



Nota. Para un agujero más pequeño se observan franjas más separadas, el punto luminoso central se llama disco de Airy.

Preguntas Orientadoras

¿Cómo se produce la difracción en el punto central?

¿Cómo explica usted que el punto central unas veces sea luminoso y otras oscuro?

¿Por qué cree que se producen franjas luminosas concéntricas alrededor del punto central?

Mediciones

Halle el diámetro de la abertura si conoce el ángulo de desviación de la primera franja brillante y la longitud de onda de la luz.

Halle la longitud de onda de la luz violeta si conoce el ángulo de desviación de la tercera franja brillante y el diámetro de la abertura.

Halle la desviación de la quinta franja brillante con una abertura de 0.5mm y luz verde.

4.5.2. Difracción por un Obstáculo Opaco Circular (Observación del Punto de Poisson)

Objetivo

Comprender la formación del punto luminoso central o punto de Poisson desde la teoría de las zonas de Fresnel, el cual se forma por la difracción por un obstáculo opaco circular.

Procedimiento 1

Materiales (Foto.22)

1. Un esfero
2. Dos palos balsos
3. Una balinera
4. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
5. Un lente bicóncavo
6. Un soporte para láser

Foto 22. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular



Haga el montaje que se muestra en la (Foto.23) ubicando la lente cerca al láser de modo que los rayos al salir de la lente diverjan de su foco. Quite la punta del esfero y póngala sobre los palos de balsa y coloque la balinera sobre la punta del esfero de tal manera que los rayos que divergen de la lente incidan en la balinera. Este experimento fue consultado en (Veritasium en Español, 2021).

Foto 23. Montaje Experimental y Observación del Punto de Poisson



Nota. El punto luminoso en el centro de la sombra se llama punto de Poisson.

Procedimiento 2

Materiales (Foto.24)

1. Una lupa o lente convergente
2. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
3. Un soporte para láser
4. Una balinera

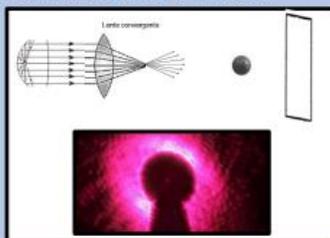
5. Una punta de esfero
6. Un palo de balsa

Foto 24. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular



Haga el montaje que se muestra en la (Foto.25), se ilumina con un láser a través de una lupa o lente convergente con el fin de ampliar el haz de luz y formar una fuente puntual, como si la luz emergiera del foco de la lupa, se hace incidir el haz ampliado sobre una balinera. Este experimento fue consultado en (El Tunel del Misterio, 2021).

Foto 25. Montaje Experimental y Observación del Punto de Poisson



Procedimiento 3

Materiales (Foto.26)

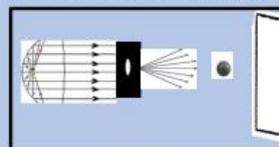
1. Un iris o abertura circular variable
2. Un láser o fuente de luz incandescente
3. Un soporte para láser
4. Una balinera
5. Una punta de esfero
6. Un palo de balsa

Foto 26. Materiales Difracción Obstáculo Opaco Circular



Haga el montaje que se muestra en la (Foto.27), la luz se hace incidir sobre el agujero de 0,5cm de diámetro, de esta manera, el haz colimado que emerge del agujero opera como una fuente puntual, este haz luminoso colimado incide sobre una balinera que se pone al otro lado del cuarto lejos de la fuente puntual. Este experimento fue consultado en (Fisicainvideo, 2019).

Foto 27. Observación del Punto de Poisson



Nota. Experimento de la mancha de Poisson colimando el haz con un pequeño agujero

Preguntas Orientadoras

¿Por qué se observa un punto luminoso en el centro de la sombra proyectada por la esfera?

¿En qué lugar del patrón de difracción se da la interferencia constructiva y destructiva?

¿Por qué el punto central luminoso desaparece usando luz blanca u otros objetos que no sean esféricos?

4.5.3. Difracción por una Rendija alargada

Objetivo

Comprender el patrón de difracción producido por una rendija alargada y relacionarlo con el patrón de difracción producido por un alambre alargado de la misma forma de la rendija.

Materiales (Foto.28)

1. Una diapositiva con rendija alargada
2. Un soporte para diapositiva
3. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
4. Un soporte para láser

Foto 28. Materiales Difracción por una Rendija Alargada



Procedimiento

Con el láser se ilumina la rendija lo más angosta posible, varíe el ancho de la rendija y observe que ocurre con el patrón de difracción sobre la pantalla (Foto 29), modifique también la longitud de onda de la fuente luminosa iluminando la rendija con un láser rojo y uno violeta y observe los cambios presentados en el patrón. Este experimento fue consultado en (PIE UCM, 2013).

Foto29. Montaje Experimental y Observación Difracción por una Rendija



Nota. Entre más angosta sea la rendija más ancha aparece la franja central.

Preguntas Orientadoras

¿Qué características del patrón de difracción se modifican al variar el ancho de la rendija?

¿Cómo se forman las franjas luminosas y oscuras según la teoría de Fraunhofer?

¿Qué diferencias encuentra entre las franjas producidas por un láser violeta y uno rojo?

Mediciones

¿Cuál es el ancho de la rendija si conoce la longitud de onda de la luz?

¿Cuál es la longitud de onda de la luz si conoce el ancho de la rendija?

¿Qué ángulo se desvía la tercera franja luminosa con una rendija de 1mm y luz violeta?

$$\text{Use la ecuación } \text{sen}\alpha = m \frac{\lambda}{D}$$

4.5.4. Difracción por el Borde de una Pantalla Opaca

Materiales (Foto.30)

1. Una diapositiva con pantalla opaca
2. Un soporte para diapositiva
3. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
4. Un soporte para láser

Foto 30. Materiales Difracción por el Borde de una Pantalla Opaca



Procedimiento

Se ilumina con una fuente puntual sobre el filo de una pantalla opaca

(Foto.31), en el límite donde termina la luz y empieza la sombra proyectada por la pantalla se pueden distinguir unas franjas brillantes intercaladas con franjas oscuras, el material del filo de la pantalla se puede reemplazar.

Foto 31. Montaje Experimental y Observación Difracción por una Pantalla Opaca



4.5.5 Difracción por un Alambre Fino Alargado

Objetivo

Analizar el patrón de difracción producido por un alambre fino alargado comparándolo con el patrón de una rendija alargada de la misma forma que el alambre.

Materiales (Foto.32)

1. Una diapositiva con alambres finos
2. Un soporte para diapositiva
3. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
4. Un soporte para láser

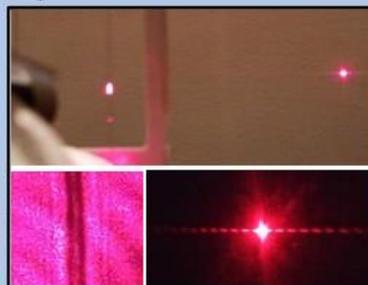
Foto 32. Materiales Difracción por un Alambre Fino Alargado



Procedimiento

Con el láser se ilumina el alambre (Foto.33), según la teoría de rayos debería proyectarse sombra que tenga la misma forma del obstáculo, sin embargo, aparece un patrón de difracción muy similar al de una rendija alargada. Teniendo en cuenta el principio de Babinet, la suma de los patrones de difracción del objeto de difracción I y su complementario I' (una rendija alargada de la misma forma del alambre) debe ser igual al haz sin obstrucción. El ancho del alambre se puede variar, así como el material del alambre.

Foto 33. Difracción por un alambre fino alargado



Nota. Al iluminar el alambre ampliando el haz con una lupa se observa (imagen inferior izquierda) en la sombra una franja brillante central y fuera de ella unas franjas oscuras.

Preguntas orientadoras

¿Por qué cree que se forma un patrón similar al de una rendija?

¿Cómo piensa que actúan las ondas de Huygens en este sistema?

¿Cómo cree que se forman las franjas internas en la sombra y las externas a ella?

Mediciones

Halle la longitud de onda de la luz verde si conoce el ancho del alambre y el ángulo de desviación de la tercera franja.

Halle el ancho del alambre si conoce el ángulo de desviación de la quinta franja y la longitud de onda de la luz.

¿Cuál es la desviación de la tercera franja con un alambre de 1mm y luz verde?

Use la ecuación $\text{sen}\alpha = m \frac{\lambda}{D}$

4.5.6 Difracción por Dos Rendijas Juntas (Experimento de Young)

Objetivos

Analizar e interpretar el experimento de Young de la doble rendija el cual valió para establecer el principio de interferencia de las ondas de Huygens.

Materiales (Foto.34)

1. Una diapositiva con dos rendijas alargadas juntas
2. Un soporte para diapositiva
3. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
4. Un soporte para láser

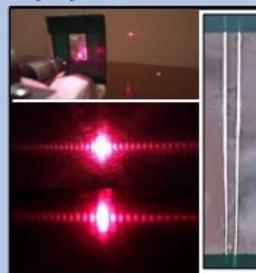
Foto 34. Materiales Difracción por Dos Rendijas Juntas



Procedimiento

Se ilumina con el láser las dos rendijas juntas alargadas (Foto.35), primero en la parte superior donde las rendijas están más separadas una de la otra, luego en el centro y en la parte inferior donde las rendijas están más juntas, observe lo que se modifica en el patrón. Este es el caso del experimento de Young de la doble rendija.

Foto 35. Montaje y Observación Difracción por dos rendijas juntas.



Nota. Para rendijas más juntas los máximos aparecen también más unidos.

Preguntas orientadoras

¿Por qué se forman máximos y mínimos de intensidad luminosa?

¿Qué ocurre al patrón con rendijas más juntas?

¿Cómo es el patrón observado usando luz violeta, verde y roja?

Mediciones

¿Cuál es la separación de las rendijas si conoce la longitud de onda de la luz?

¿Cuál es la longitud de onda de la luz si conoce la separación de las rendijas?

¿Cuál es la desviación de la décima franja luminosa con una separación de rendijas de 1mm y luz violeta?

Use la ecuación $\text{sen}\alpha = m \frac{\lambda}{d}$

4.5.7 Difracción por una Placa Zonal de Fresnel con Zonas Pares Abiertas

Objetivos

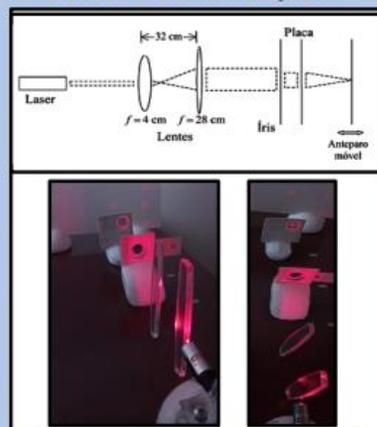
Comprender que las placas de Fresnel actúan como lentes convergentes con su respectiva distancia focal, esto debido a la difracción de la luz a través de las zonas abiertas y la interferencia de esta en la pantalla según el principio de Huygens-Fresnel.

Materiales (Foto.36)

1. Una diapositivas con placas de Fresnel
2. Dos Láser de 650 nm y 405 nm
3. Dos lentes biconvexas o convergentes
4. Un soporte para láser
5. Dos soportes para diapositivas
6. Un iris o abertura variable

Foto 36. Materiales Difracción por una Placa Zonal de Fresnel**Procedimiento**

Para medir la distancia focal de las lentes de Fresnel se utiliza el montaje experimental (Foto.37), en el cual se usan dos lentes convergentes para expandir el haz con distancias focales de 4 cm y 28 cm y las dos separadas una distancia igual a la suma de sus distancias focales, el diámetro del haz expandido debe exceder la placa más grande, se utiliza un iris de diámetro ajustable para que todas las zonas queden iluminadas. La distancia focal se obtiene moviendo la pantalla hasta visualizar el punto más brillante sobre la pantalla (Muller, 2005).

Foto 37. Montaje Experimental para Medir las Distancias Focales de las placas

Nota. Imagen superior reproducida de Montaje Experimental Usado para Medir las Distancias Focales de las Lentes de Fresnel, Márcia Muller et al, 2005. https://pdfs.semanticscholar.org/238c/2e8d44fbd31ce640e073824b5e2575fa090b.pdf?_ga=2.83419094.1373544422.1647605328-177934577.1645152296.

Preguntas orientadoras

¿Cómo se produce la interferencia en el punto central sobre la pantalla?

¿Qué función cumplen las zonas abiertas y las tapadas en la difracción?

¿Cómo evidencia el principio de Huygens-Fresnel en esta experiencia?

Mediciones

Realice una tabla donde muestre los siguientes valores: distancia cámara plantilla $d_{cp}(m)$, diámetro de la placa obtenida hasta la vigésima zona $D_{20}(mm)$ y distancia focal de la placa obtenida $f(cm)$ (Ec.15). Mida las distancias focales de las placas con luz verde, roja y violeta.

ANEXO TEÓRICO DE ALGUNOS EXPERIMENTOS

Experimento 4.5.1.

Midamos el cambio de intensidad en el punto P al interponer al frente de onda una pequeña abertura circular (Fig.1). Si la distancia OR es igual a la longitud S_1 del borde exterior de la primera zona la amplitud en el punto P será A_1 según la ecuación $A \approx \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}$, ya que para un número pequeño de zonas abiertas $A_1 \cong A_m$, A_1 resulta ser el doble de la amplitud del frente de onda sin obstrucción.

Abriendo más el diámetro de la abertura hasta dos zonas la amplitud en P será $A=0$ según la ecuación $A \approx \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}$.

Entonces, un aumento del diámetro de la abertura hará cambiar la amplitud en P de luminoso a oscuro según el número de zonas contenidas en la abertura sean pares o impares.

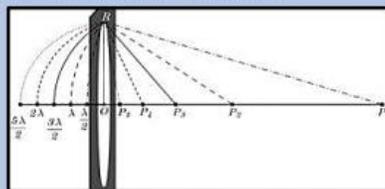
Figura 1. Variación de la intensidad en P debido a la difracción por zonas de Fresnel



Nota. Haciendo uso de las zonas de Fresnel, la intensidad en P cambia de luminoso a oscuro al variar el diámetro de la abertura.

En la Fig.2 se muestra un zoom de la abertura circular, si se acerca el punto P (pantalla) hacia la abertura, la diferencia de camino es $P_1R-P_1O=\lambda/2$ equivalente a dos zonas y oscuridad en p , si nos movemos hasta P_2 la diferencia de camino aumenta $P_2R-P_2O=\lambda$ que equivale a tres zonas y luminosidad en p , si nos movemos hasta P_3 la diferencia de camino aumenta $P_3R-P_3O=3\lambda/2$ que equivale a cuatro zonas, etc.

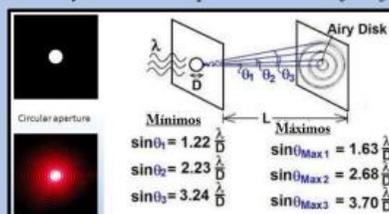
Figura 2. Zoom de la abertura, permite comprender la variación de las zonas por aproximación hacia la abertura.



Nota. Aumento del número de zonas por aproximación hacia la abertura, esto muestra que la abertura produce puntos oscuros y puntos luminosos en P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 .

Entonces, el número de zonas cambia de impar a par cuando nos aproximamos hacia el agujero, se evidencia por tanto máximos y mínimos a medida que nos desplazamos a lo largo del eje (Ec.9) y (Ec.10), el agujero tiene varios focos, además, el punto P está también rodeado por un sistema de anillos luminosos concéntricos cuyos ángulos se hallan según las ecuaciones de la Fig.3.

Figura 3. Difracción por una abertura circular y ecuaciones para hallar las franjas.

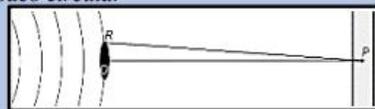


Experimento 4.5.2.

El método de Fresnel predice que debe haber un punto luminoso (punto de Poisson) en el centro de la sombra geométrica que proyecta un pequeño disco o una balinera (Fig.4). Se cuentan las zonas desde el borde del disco, si la distancia PR es igual a $d+\lambda/2$, el borde exterior de la segunda zona dista de P en $d+2\lambda/2$, el de la

tercera zona en $d+3\lambda/2$, el de la cuarta zona en $d+4\lambda/2$, etc. La suma de las contribuciones en amplitud de todas las zonas en el punto P es, en este caso, la mitad de la amplitud de la primera zona $\frac{A_1}{2}$ según las ecuaciones $A \approx \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}$ y $A \approx \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}$, ya que se tiene un gran número de zonas abiertas, excepto la primera zona, lo que implica que $A_m = 0$.

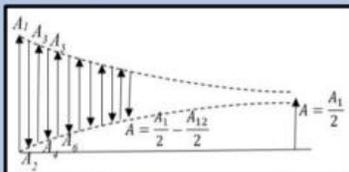
Figura 4. Difracción por un obstáculo opaco circular



Nota. Las zonas se cuentan desde el borde del disco hacia afuera alejándose del centro.

En la (Fig.5) se obtiene este resultado quitando el primer vector, por tanto, la amplitud en P es igual a la obtenida por la onda sin obstruir. Alrededor de P se puede distinguir unos anillos concéntricos que bordean el interior y exterior de la sombra.

Figura 5. Vectores de amplitud de las zonas de Fresnel



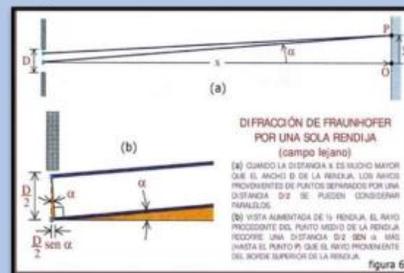
El objetivo es observar el punto de Poisson el cual se forma en el centro de la sombra geométrica proyectada por una esfera. La balinera de acero es ideal para este experimento por sus contornos lisos, una esfera con bordes rugosos o un objeto con otra forma geométrica, que no sea esférica, no generará el punto luminoso.

En 1818 no había láseres, el experimento fue realizado con luz blanca, Poisson no realizó el experimento, la idea de un punto brillante en el centro de una sombra le parecía descabellada, Fresnel tampoco lo realizó, pero otro de los jueces Arago si lo realizó observando el punto luminoso en el lugar predicho por Poisson.

Experimento 4.5.3.

Un frente de onda plano incide en la rendija, por tanto, las ondas secundarias emergentes de la rendija están en fase, se escogen dos bandas infinitesimales una bajo el borde superior de la rendija y otra bajo su centro (Fig.6). Se conciben ondas secundarias, según el principio de Huygens-Fresnel, que emergen de estas dos bandas formando un ángulo α con la horizontal, la onda inferior transita una distancia mayor que la superior hasta llegar a la pantalla al punto P . Esta distancia es $\delta = \frac{D}{2} \sin \alpha$ siendo D el ancho de la rendija.

Figura 6. Difracción de Fraunhofer por una rendija



Nota. Reproducida de Difracción de Fraunhofer por una sola Rendija, Sandra Silvester, s.f., <https://www.fro.utn.edu.ar/>.

Si las dos ondas inciden en P con una diferencia de caminos δ de $\lambda/2$ se produce una franja oscura en P debido a que $\delta = \frac{D}{2} \sin \alpha = \pm \frac{1}{2} \lambda$, $\sin \alpha = \pm \frac{\lambda}{D}$.

esta ecuación es cierta si las rectas son paralelas lo cual es muy aproximado puesto que $X \gg D$, el valor de δ determina si en el punto P se produce una franja brillante o una oscura, si δ es cero o un múltiplo entero de λ se produce en P una franja brillante $\delta = \frac{D}{2} \text{sen} \alpha = m\lambda$. Si δ es múltiplo entero de λ más $\lambda/2$ se produce en P una franja oscura $\delta = \frac{D}{2} \text{sen} \alpha = (m+1/2)\lambda$ donde $m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm m$.

Todas las ondas secundarias que emergen de la rendija siguen caminos paralelos hacia P, entonces si se toman dos bandas debajo de las anteriores sus ondas también inciden en P con la misma δ de las anteriores produciendo también oscuridad. Así las ondas de las bandas de la mitad superior de la rendija interfieren destructivamente con las de las bandas de la mitad inferior produciendo en P una zona oscura.

Si la rendija se divide en cuatro y se toma una banda debajo del borde superior de la rendija y una debajo del primer cuarto, esta δ a P ya no sería de $\lambda/2$ sino un valor menor, por tanto, para que δ sea $\lambda/2$ estas dos ondas se inclinan a un punto Q más alejado del centro de la pantalla creando otra zona oscura.

Entonces, si se divide la rendija en cuatro, seis, ocho, etc. Se perciben zonas oscuras así $\text{sen} \alpha = \pm 2 \frac{\lambda}{D}, \pm \frac{3\lambda}{D}, \dots, \pm m \frac{\lambda}{D}$ donde $m=1,2,3,\dots$

Si la rendija tiene un ancho $D=20\lambda$ se observan mínimos en $\text{sen} \alpha = \pm \frac{1}{20}; = \pm \frac{2}{20}; = \pm \frac{3}{20}, \dots$. También hay franjas brillantes, el ángulo al primer mínimo es el ancho semiangular, el ancho angular es el doble y es el que abarca la franja central brillante, si el ancho de la rendija mide $D=10\lambda$ la anchura de la franja central es $\text{sen} \alpha = \pm \frac{1}{10}, \alpha = 11.5^\circ$ (Silvester, s.f.).

Si el ancho de la rendija mide $D=1\lambda$ entonces, $\text{sen} \alpha=1, \alpha=90^\circ$ y la franja central diverge en un ángulo de 180° . Si la rendija tiene un ancho de varias λ el ángulo α es pequeño y $\text{sen} \alpha \approx \alpha$ con lo cual queda $\alpha = \pm m \frac{\lambda}{D}$ (Silvester, s.f.).

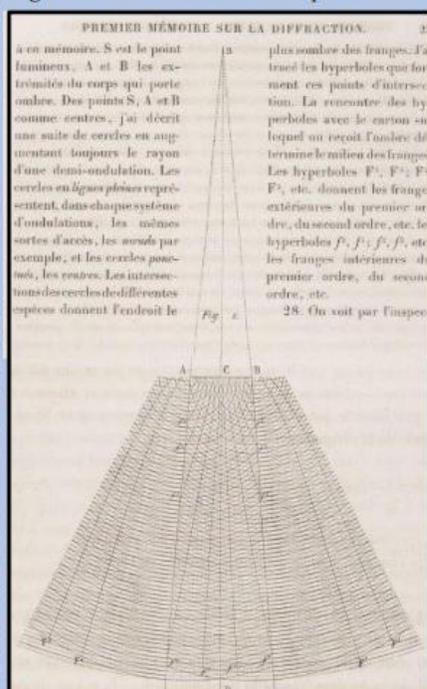
También si la distancia del centro de la rendija a la pantalla es X y la distancia del centro de la pantalla a un mínimo es Y_m , entonces, si $X \gg Y_m$ la $\text{tag} \alpha = \frac{Y_m}{X}$ y se aproxima $Y_m = \pm X m \frac{\lambda}{D}$.

Experimento 4.5.5.

Fresnel estudió bastante las franjas exteriores sin fijarse en las franjas internas, las franjas exteriores eran más fáciles de observar, sin embargo, las franjas interiores fueron las que condujeron a explicar el fenómeno. Obstruyó los rayos de un lado del alambre y observó que las franjas interiores dentro de la sombra desaparecían. Ya, que al interceptar la luz que llega de un lado del alambre las franjas interiores se eliminan, la confluencia de los rayos que llegan de ambos bordes del alambre es necesaria para la formación de las franjas internas. Cuando el alambre era muy delgado, las franjas externas de un lado de la sombra se volvían ligeramente cóncavas hacia la sombra, de esto concluye que la luz que se dobla a un lado del alambre tiene influencia en las franjas externas del lado contrario. Por otro lado, observó que las franjas no se modifican con la masa o la superficie del alambre, si se tiene un alambre fino o más ancho, un alambre de metal pulido o ennegrecido las franjas son las mismas (De Senarmont et al, 1866).

De los experimentos de Young y Fresnel se concluyó que el fenómeno se produce por el cruce de luz tanto en el interior como en el exterior de la sombra (Fig. 7).

Figura 7. Ilustración elaborada por Fresnel



Nota. Centros ondulatorios según Fresnel cuando la luz incide en un alambre delgado. Reproducida de Forma en que concibo el cruce de las ondulaciones, Henri de Senarmont et al., 1866, <https://gallica.Bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1512245j/f11.item>.

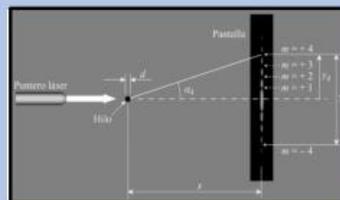
Las franjas externas se forman por el cruce de luz que proviene del punto luminoso S y de luz que se dobla en los dos bordes del alambre A y B , mientras que las internas se forman por el cruce de luz que se dobla en los dos bordes del alambre. Se consideran tres fuentes de ondulaciones S , A y B , el punto luminoso donde proviene la luz primaria y los dos bordes del cable, las intersecciones de las proyecciones de las tres ondas circulares dan la posición de las franjas. Los puntos fuera de la sombra $F1$, $F2$ que corresponden a las franjas externas de primer y segundo orden, y

los puntos en la sombra $f1$, $f2$, $f3$, $f4$, $f5$ que corresponden a las franjas internas. Si la pantalla se aproxima al alambre se espera observar más cantidad de franjas internas (Fig.7) (De Senarmont et al, 1866).

Cuando se observan las franjas desde un punto más lejano los rayos se cruzan en un ángulo más pequeño, las franjas se ensanchan y se hace más difícil ubicar los puntos de paso del rojo al violeta. Además, estas franjas parecen hipérbolas cuyos focos son el punto luminoso y el borde del cable siendo las de tercer orden más convexas que las de primer orden, pero menos nítidas y más confusas. La luz no se propaga en forma curva, sino que al medir los anchos de las franjas estas no son las ordenadas de una línea recta sino las abscisas de una hipérbola.

Los máximos y mínimos son parecidos a los producidos por una rendija (Fig.8), por tanto, se hace uso de las mismas ecuaciones del experimento 4.5.3.

Figura 8. Difracción por un alambre delgado

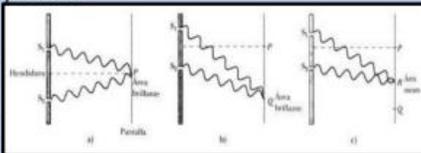


Experimento 4.5.6.

Debido a la perturbación que una onda realiza en dos rendijas donde se originan dos ondas cilíndricas, la superposición de estas dos ondas en una pantalla proporcionará unas regiones donde las ondas se anulen entre sí y otras donde se sumen o amplifiquen, lo que Young denominó en 1802 como principio de interferencia de ondas luminosas.

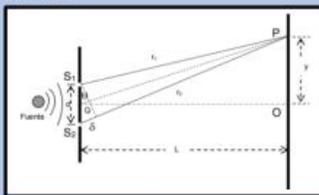
En la Fig. 9 se muestran dos ondas que emergen desde las dos rendijas S1 y S2, en a) las dos ondas parten en fase desde las rendijas y llegan al punto P en el centro de la pantalla también en fase produciendo una franja brillante, ya que la distancia que recorren es igual. En b) la onda que emerge de S1 debe recorrer una longitud de onda adicional hasta llegar al punto Q, pero también ambas ondas llegan en fase produciendo otra franja brillante. En c) en un punto R entre P y Q la onda que emerge de S1 debe recorrer media longitud de onda adicional que la onda que emerge de S2, por tanto, llegan al punto R desfasadas produciendo una franja oscura.

Figura 9. Interferencia de dos ondas en una pantalla



En la (Fig.10) las ondas que emergen de S1 y S2 llegan a un punto P cualquiera, la onda que emerge de S2 debe recorrer una distancia mayor que la que emerge de S1, esa distancia es $\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$,

Figura 10. Esquema para cuantificar el experimento



Se puede medir la posición de las franjas brillantes y oscuras sabiendo que en la práctica $L \gg d$ y $d \gg \lambda$ se tiene entonces del triángulo OPQ el ángulo θ es muy pequeño y se puede aproximar $\sin \theta = \tan \theta = Y/L$ y usando la ecuación de la distancia adicional se tiene

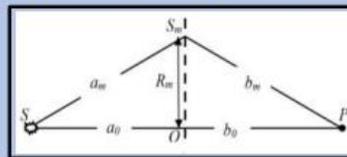
que $Y_{\text{brillantes}} = \frac{\lambda L}{d} m$ de igual forma las franjas oscuras se sitúan en $Y_{\text{oscuras}} = \frac{\lambda L}{d} (m + \frac{1}{2})$.

Experimento 4.5.7.

La contribución en la amplitud de zonas contiguas se cancela, en consecuencia, si se tapan las zonas pares o impares hay un aumento significativo en la intensidad en el punto P, este hecho se puede ilustrar en la Fig.5 representando la amplitud de cada zona con un vector, los que apuntan hacia arriba representan las amplitudes de las zonas impares y hacia abajo las de las zonas pares. Si se tapan las zonas pares los vectores que apuntan hacia abajo no contribuirían y se eliminan, los que apuntan hacia arriba se sumarían y la intensidad en el punto P aumentaría.

La placa de Fresnel se puede elaborar calculando los radios de las zonas (Fig.11) S_m es el borde de la m-ésima zona, a_m y b_m son las distancias fuente-emésima zona y emésima zona-punto P respectivamente, a_0 y b_0 son las distancias fuente-primera zona y primera zona-punto P respectivamente, el radio exterior de la emésima zona es R_m . Una onda que tome el camino de cualquier zona SS_mP llegara retrasada la punto P en una cantidad $m\lambda/2$ con respecto a otra que tome el camino de la primera zona SOP . Se puede escribir la diferencia de caminos como (Muller et al., 2005),

Figura 11. Geometría de la placa de Fresnel



Nota. Adaptada de Geometría de la Placa de Zonas de Fresnel., Márcia Muller, 2005,

https://pdfs.semanticscholar.org/238c/2c8d44fbd31ce640e073824b5e2575fa090b.pdf?_ga=2.83419094.1373544422.1647605328-177934577.1645152296

$$a_m + b_m = (a_0 + b_0) + m \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Y usando Pitágoras (Muller et al., 2005),

$$a_m = (a_0^2 + R_m^2)^{\frac{1}{2}}, \quad b_m = (b_0^2 + R_m^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Las expresiones (12) se pueden expandir en serie, considerando que R_m es pequeño en comparación con a_0 y b_0 se toman en cuenta solo los dos primeros términos (Muller et al., 2005),

$$a_m = a_0 + \frac{R_m^2}{2a_0}, \quad b_m = b_0 + \frac{R_m^2}{2b_0} \quad (13)$$

Usando las expresiones (13) podemos reescribir (11) como (Muller et al., 2005),

$$\left(\frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0}\right) = \frac{m\lambda}{R_m^2} \quad (14)$$

Esta ecuación es semejante a la de las lentes delgadas, la distancia focal viene dada por (Muller et al., 2005),

$$f = \frac{R_m^2}{m\lambda} \quad (15)$$

Las ecuaciones (14) y (15), muestran que las placas zonales funcionan como lentes con distancias focales para una longitud de onda. Reescribiendo (14) el radio de la m -ésima zona (Muller et al., 2005),

$$R_m = \left(\frac{m\lambda}{\left(\frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0}\right)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Notamos en la expresión (16) que el radio de las zonas sucesivas aumenta con $m^{1/2}$. Si se halla el radio de la primera zona R_1 los otros radios sucesivos serán (Muller et al., 2005),

$$R_1, \sqrt{2}R_1, \sqrt{3}R_1, 2R_1, \dots, \sqrt{m}R_1$$

La distancia focal de la placa está dada por la ecuación (15) como el radio de la m -ésima zona es $\sqrt{m}R_1$ podemos escribir la distancia focal (Muller et al., 2005),

$$f = \frac{(\sqrt{m}R_1)^2}{m\lambda} = \frac{R_1^2}{\lambda}$$

De esta manera vemos que la distancia focal de la placa para una longitud de onda fija depende del radio de la primera

zona, además, la distancia focal depende de la longitud de onda, es mayor para longitud de onda corta luz violeta y menor para longitud de onda larga luz roja.

ANEXOS

4.3.10. Elaboración de las Placas Zonales de Fresnel

Se recomienda que el docente lleve las placas zonales de Fresnel al aula ya elaboradas debido a que en la actualidad ya entraron en desuso los negativos fotográficos y solamente se pueden revelar en algunos establecimientos de la ciudad de Bogotá.

Con el programa Geogebra se elabora una plantilla de la placa en papel blanco con 20 zonas (Foto.38), el radio de la primera zona se toma de 2 cm y los radios continuos se calculan según la ecuación $R_1, \sqrt{2}R_1, \sqrt{3}R_1, 2R_1, \dots, \sqrt{m}R_1$ se imprimen con tinta negra solamente las zonas pares.

Para producir placas en las cuales varíen los radios, se toman 5 fotografías a la plantilla variando la distancia plantilla-cámara desde la mínima distancia de enfoque de la cámara corriéndola cada 15cm (Foto.39). Después de revelados cada negativo contiene una placa diferente (Foto.40), las cuales pueden enfocar la luz, cuyo tamaño depende de la distancia a la que se tomó la fotografía. Es necesario alinear la lente de la cámara a la misma altura del centro de la placa, además evitar corrimientos laterales de la placa y de la cámara. Las distancias focales de las placas dependen de la longitud de onda que incide en ellas y del radio de la primera zona según la ecuación

$$f = \frac{(\sqrt{m} R_1)^2}{m\lambda} = \frac{R_1^2}{\lambda} \text{ (Muller, 2005).}$$

Foto 38. Plantillas Zonas de Fresnel

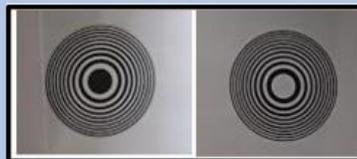


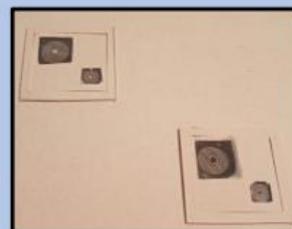
Foto 39. Toma de Fotografías a la Plantilla



Foto 40. Negativos Revelados

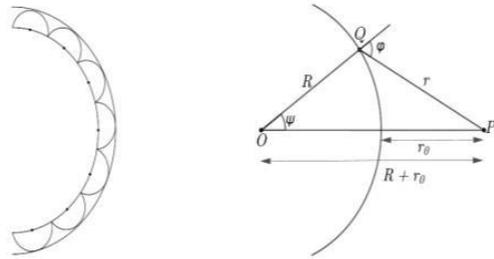


Foto 41. Placas de Fresnel Ubicadas en el Marco



Anexo 2: Factor de oblicuidad

El factor de oblicuidad: principio de propagación de Huygens-Fresnel: Según Huygens todo frente de onda primario perturba el espacio, cada punto de un frente de onda puede ser considerado como fuente de ondas secundaria que se expanden como una esfera. Pero, Fresnel notó que en esta construcción las ondas no se proyectaban hacia atrás, por lo que introduce el factor de oblicuidad $K(\varphi)$ donde la amplitud de las ondas secundarias depende del ángulo φ , entre la normal al frente de onda en Q y la recta r que une a Q con P .



$$K(\varphi) = \begin{cases} \text{max}, & \varphi = 0 \\ 0, & \varphi \geq \pi/2 \end{cases}$$

Solucionaba el hecho que emergiese una onda propagándose hacia atrás.

Anexo 3: Análisis para un número de zonas par

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \pm A_m$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \dots + \left(\frac{A_{m-3}}{2} - A_{m-2} + \frac{A_{m-1}}{2}\right) + \frac{A_{m-1}}{2} - A_m \quad (1)$$

$$A = A_1 - \frac{A_2}{2} - \left(\frac{A_2}{2} - A_3 + \frac{A_4}{2}\right) - \left(\frac{A_4}{2} - A_5 + \frac{A_6}{2}\right) - \dots - \left(\frac{A_{m-2}}{2} - A_{m-1} + \frac{A_m}{2}\right) - \frac{A_m}{2} \quad (2)$$

Si $A_j > \frac{A_{j+1}}{2} + \frac{A_{j-1}}{2}$ todos los términos entre paréntesis en las ecuaciones (1) y (2) serán

negativos se tiene:

$$A < \frac{A_1}{2} + \frac{A_{m-1}}{2} - A_m \quad (3)$$

$$A > A_1 - \frac{A_2}{2} - \frac{A_m}{2} \quad (4)$$

haciendo las mismas aproximaciones $A_1 \approx A_2$ y $A_{m-1} \approx A_m$ las ecuaciones (3) y (4)

quedan:

$$A < \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} \quad (5)$$

$$A > \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2} \quad (6)$$

De las dos últimas ecuaciones (5) y (6) se puede concluir que:

$$A \approx \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}$$